



ANÁLISE DAS PERDAS NO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Jonathan Carvalho de Vasconcellos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Sebastião Ércules Melo Oliveira, D.Sc.

Rio de Janeiro

Abril de 2013

ANÁLISE DAS PERDAS NO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Jonathan Carvalho de Vasconcellos

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Sebastião Ércules Melo Oliveira, D.Sc.

(Orientador)

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

(Examinador)

Prof. Alexandre Coelho, M.Sc.

(Examinador)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL de 2013

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus por me dar saúde e perseverança para alcançar este importante objetivo em minha vida.

Sou grato aos meus pais, Getulio e Claudete, por não terem medido esforços para oferecer todas as condições de me concentrar apenas nos estudos e por me apoiarem durante toda minha vida.

Aos meus irmãos, Getulio e Ingrid, porque sempre estiveram dispostos a me ajudar quando precisei deles e, tenho certeza, sempre torceram por mim.

A todos os professores da UFRJ e do Departamento de Engenharia Elétrica que contribuíram para minha formação e, particularmente, ao Professor Sebastião Oliveira por confiar em mim para a realização deste trabalho e pelos ensinamentos durante as suas aulas, que foram fundamentais para a realização do mesmo.

Gostaria de agradecer aos funcionários do Laboratório de Máquinas, André e Jorginho, pelos conselhos, paciência e auxílio na realização dos procedimentos em laboratório e também ao Valberg por me fornecer componentes essenciais para a execução dos ensaios.

Sou grato, especialmente, ao Professor Deilton Gomes pelas conversas e dicas, sem as quais eu teria muitas dificuldades para concluir este projeto.

Finalmente, agradeço a todos os meus amigos de faculdade que me ajudaram na execução deste trabalho, seja com palavras de incentivo ou com o auxílio em atividades relacionadas a outras disciplinas, permitindo que eu me concentrasse na conclusão do projeto.

Resumo

A proposta principal deste trabalho foi estabelecer como os mecanismos de perdas de energia se modificam nos transformadores monofásicos de potência em função da variação dos sinais oriundos da rede elétrica e da configuração de carga que estiver conectada ao equipamento. Para isso, foi utilizado um osciloscópio e seu respectivo software de análise e aquisição de dados para a realização de diversos ensaios e medições num transformador de 1 kVA.

Primeiramente, foram feitos os ensaios a vazio e de curto-circuito para o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do transformador em regime permanente e condições nominais de operação. Pôde-se perceber também, através do ensaio a vazio, o surgimento e composição harmônica da corrente de excitação responsável por magnetizar o núcleo do transformador e permitir a transferência de potência entre os circuitos conectados no primário e secundário.

Em seguida, utilizou-se um circuito RC conectado nos terminais do secundário do transformador para obtenção da relação $B \times H$ do mesmo diretamente, a partir de medições de corrente no primário e tensão sobre o capacitor, permitindo o cálculo das perdas no núcleo do equipamento para diferentes sinais de entrada.

Depois foram feitas diversas medições de potência através de uma funcionalidade do osciloscópio utilizado para cálculo das perdas nos enrolamentos e no núcleo do transformador em três diferentes situações de carregamento: sem carga, com carga resistiva e com carga indutiva. Esses resultados foram comparados com simulações no *Simulink*, feitas com base no circuito equivalente obtido, para avaliar o modelo de funcionamento do transformador monofásico nas diferentes condições.

Abstract

The main focus of this work was to define how power losses in single phase power transformers are modified according to their power supply and configuration of load connected to the equipment. Some tests were made for a 1 kVA transformer and all results and measurements were taken through an oscilloscope and his software for analysis and data acquisition.

The short-circuit and open-circuit tests were made to determine the constants of the equivalent circuit of the transformer. The open-circuit test allowed also to visualize appearance and harmonic composition of the exciting current which is responsible for power exchange between the primary and secondary windings.

After that, to measure the hysteresis loop of the transformer was determined by measurements of current on the primary and voltage at the secondary winding of the transformer, with an integrator circuit RC connected to its terminals, making it easier to calculate the power losses in the transformer core.

Finally, power measurements were taken, through a feature of the oscilloscope, to evaluate the losses that occur on windings and inside of the core for three different load conditions: no load, resistive load and inductive load. These results were compared with *Simulink* simulations, which were made with the equivalent circuit as a reference, to evaluate the model of operation for the single phase transformer under different conditions.

Sumário

Agradecimentos.....	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Sumário	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	x
1 Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura do Trabalho.....	2
2 Fundamentos Teóricos.....	4
2.1 Considerações Iniciais.....	4
2.2 Princípios Básicos dos Transformadores Monofásicos.....	4
2.3 Histerese Magnética	5
2.4 Análise de um Transformador Ideal.....	7
2.5 O Transformador Real.....	13
2.5.1 Resistências dos Enrolamentos.....	14
2.5.2 Reatâncias de dispersão.....	15
2.5.3 Relação de Transformação	16
2.5.4 Corrente de Excitação	17
2.5.5 Reatância e Resistência do Núcleo.....	19
2.5.6 Polaridade	20
2.5.7 Circuito Equivalente	21
2.5.8 Funcionamento com Carga	23
2.6 Ensaio para Especificação do Transformador	25
2.6.1 Ensaio a Vazio.....	25

2.6.2	Ensaio de Curto-Circuito.....	27
3	Procedimentos Experimentais e Resultados	30
3.1	Considerações Iniciais.....	30
3.2	Equipamentos Utilizados	32
3.3	Ensaio de Curto-circuito	33
3.4	Ensaio a Vazio.....	36
3.5	Medição do laço de histerese	46
3.6	Medições de Potência para Diferentes Condições de Carga	54
3.6.1	Sem Carga.....	55
3.6.2	Carga Resistiva.....	60
3.6.3	Carga Indutiva	68
4	Simulações e Comparações	75
4.1	Sem Carga	77
4.2	Carga Resistiva.....	82
4.3	Carga Indutiva.....	86
5	Conclusões	92
5.1	Conclusões	92
5.2	Trabalhos Futuros.....	93
6	Referências Bibliográficas	94

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Curva $B \times H$ para materiais ferromagnéticos [6]	6
Figura 2.2 - Transformador Ideal [1]	7
Figura 2.3 – Resistências e reatâncias de um transformador.....	14
Figura 2.4 – Vista esquemática dos fluxos mútuo e disperso de um transformador [1].....	15
Figura 2.5 – (a) Ondas de tensão, fluxo e corrente de excitação de um transformador; (b) Laço de histerese do material do núcleo correspondente [1] ...	18
Figura 2.6 – Comparação entre as Correntes de Foucault de um núcleo sólido e de outro laminado [8].....	20
Figura 2.7 - Influência das perdas no núcleo sobre o laço de histerese [10]	22
Figura 2.8 – Circuito Equivalente do transformador [1]	23
Figura 2.9 - Diagrama fasorial para diferentes tipos de carga: (a) indutiva; (b) capacitiva e (c) puramente resistiva [2]	24
Figura 2.10 – Ligações típicas dos instrumentos para o ensaio a circuito aberto [2]	26
Figura 2.11 - Ligações típicas dos instrumentos para o ensaio de curto-circuito [2]	28
Figura 3.1 – Vista dos terminais e das ligações dos enrolamentos do transformador ensaiado	30
Figura 3.2 – Osciloscópio TPS 2012	32
Figura 3.3 - Reta obtida do Ensaio de Curto-circuito	35
Figura 3.4 - Curva de Saturação obtida no Ensaio a Vazio	38
Figura 3.5 – Circuito Equivalente obtido.....	39
Figura 3.6 - Corrente de Excitação para alimentação de 100 V	40
Figura 3.7 – Composição Harmônica da Corrente de Excitação para alimentação de 100 V	40
Figura 3.8 - Corrente de Excitação para alimentação de 160 V	41
Figura 3.9 - Composição Harmônica da Corrente de Excitação para alimentação de 160 V	41
Figura 3.10 - Corrente de Excitação para alimentação de 200 V	42

Figura 3.11 - Composição Harmônica da Corrente de Excitação para alimentação de 200 V	42
Figura 3.12 - Corrente de Excitação para alimentação de 220 V	43
Figura 3.13 - Composição Harmônica da Corrente de Excitação para alimentação de 220 V	43
Figura 3.14 - Corrente de Excitação para alimentação de 260 V	44
Figura 3.15 - Composição Harmônica da Corrente de Excitação para alimentação de 260 V	44
Figura 3.16 – Circuito integrador RC	48
Figura 3.17 - Conexão do circuito RC no secundário	49
Figura 3.18 - Curva de Histerese para alimentação de 101 V	50
Figura 3.19 - Curva de Histerese para alimentação de 160 V	51
Figura 3.20 - Curva de Histerese para alimentação de 200 V	51
Figura 3.21 - Curva de Histerese para alimentação de 220 V	52
Figura 3.22 - Curva de Histerese para alimentação de 250 V	52
Figura 3.23 - Potência medida para tensão de 160,26 V e operação a vazio	58
Figura 3.24 - Potência medida para tensão de 160,26 V e operação a vazio	58
Figura 3.25 - Potência medida para tensão de 202,26 V e operação a vazio	59
Figura 3.26 - Potência medida para tensão de 220,03 V e operação a vazio	59
Figura 3.27 - Potência medida para tensão de 259,91 V e operação a vazio	60
Figura 3.28 – Arranjo das lâmpadas usadas como carga resistiva	60
Figura 3.29 – Potência medida no primário para tensão de alimentação de 100,35 V e carga resistiva.....	66
Figura 3.30 - Potência medida no secundário para tensão de alimentação de 100,35 V e carga resistiva.....	66
Figura 3.31 - Potência medida no primário para tensão de alimentação de 219,98 V e carga resistiva.....	67
Figura 3.32 - Potência medida no secundário para tensão de alimentação de 219,98 V e carga resistiva.....	67
Figura 3.33 - Potência medida no primário para tensão de alimentação de 100,72 V e carga indutiva	72
Figura 3.34 - Potência medida no secundário para tensão de alimentação de 100,72 V e carga indutiva	73

Figura 3.35 - Potência medida no primário para tensão de alimentação de 221,35 V e carga indutiva	73
Figura 3.36 - Potência medida no secundário para tensão de alimentação de 221,35 V e carga indutiva	74
Figura 4.1 – Circuito utilizado nas simulações	76
Figura 4.2 - Potência simulada para tensão de 49,14 V e operação a vazio	79
Figura 4.3 - Potência simulada para tensão de 160,26 V e operação a vazio	80
Figura 4.4 - Potência simulada para tensão de 202,26 V e operação a vazio	80
Figura 4.5 - Potência simulada para tensão de 220,03 V e operação a vazio	81
Figura 4.6 - Potência simulada para tensão de 259,91V e operação a vazio	81
Figura 4.7 - Potência simulada no primário para tensão de alimentação de 100,35 V e carga resistiva.....	84
Figura 4.8 - Potência simulada no secundário para tensão de alimentação de 100,35 V e carga resistiva.....	85
Figura 4.9 - Potência simulada no primário para tensão de alimentação de 219,98 V e carga resistiva.....	85
Figura 4.10 - Potência simulada no secundário para tensão de alimentação de 219,98 V e carga resistiva.....	86
Figura 4.11 - Potência simulada no primário para tensão de alimentação de 100,72 V e carga indutiva	89
Figura 4.12 - Potência simulada no secundário para tensão de alimentação de 100,72 V e carga indutiva	90
Figura 4.13 - Potência simulada no primário para tensão de alimentação de 221,35 V e carga indutiva	90
Figura 4.14 - Potência simulada no secundário para tensão de alimentação de 221,35 V e carga indutiva	91

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Dados do Transformador Ensaiado	31
Tabela 3.2 – Ensaio de Curto-circuito	34
Tabela 3.3 – Ensaio a Vazio	37
Tabela 3.4 - Medições da Corrente de Excitação.....	45
Tabela 3.5 – Perdas no núcleo encontradas a partir das medições do laço de histerese	53
Tabela 3.6 – Cálculo das perdas para transformador sem carga	57
Tabela 3.7 - Cálculo das perdas no primário para transformador operando com carga resistiva	63
Tabela 3.8 - Cálculo das perdas no secundário e no núcleo para transformador operando com carga resistiva	64
Tabela 3.9 - Cálculos das perdas no primário para transformador operando com carga indutiva.....	70
Tabela 3.10 - Cálculos das perdas no secundário e no núcleo para transformador operando com carga indutiva	71
Tabela 4.1 – Resultados das Simulações para transformador sem carga.....	77
Tabela 4.2 – Comparação entre as perdas no núcleo obtidas por diferentes métodos	78
Tabela 4.3 - Resultados das Simulações para transformador com carga resistiva .	82
Tabela 4.4 - Comparação entre as perdas no núcleo obtidas por medição e simulação para operação com carga resistiva.....	83
Tabela 4.5 - Resultados das Simulações para transformador com carga indutiva..	87
Tabela 4.6 - Comparação entre as perdas no núcleo obtidas por medição e simulação para operação com carga indutiva	88

1 Introdução

1.1 Motivação

A eletricidade é de fundamental importância para o desenvolvimento da humanidade e, como a nossa sociedade está em constante progresso, existe uma demanda crescente de energia elétrica. Assim, é necessária a ampliação da geração, transmissão e distribuição da energia, requerendo a constante transformação desta para diferentes níveis de tensão. Por isso, é essencial o melhor entendimento do princípio de funcionamento dos transformadores, através da análise de estudos de desempenho destes equipamentos em diversas condições de funcionamento, para poder-se utilizá-los de maneira eficiente.

Esses estudos têm dois focos principais: o primeiro deles é a realização de ensaios práticos em equipamentos de teste, com características constitutivas semelhantes às do equipamento que será efetivamente instalado no sistema elétrico, para determinar os parâmetros necessários na representação do transformador em condição padrão de funcionamento, assim como seu comportamento em situações atípicas que podem ser causadas por diversos fatores inerentes ao sistema no qual o transformador estará inserido. O segundo objetivo é a criação de modelos matemáticos – com base nos dados de placa, curvas de histerese e parâmetros do circuito equivalente obtidos através dos ensaios práticos – para análise do desempenho eletromagnético do equipamento a partir de simulações computacionais.

Um aspecto importante da operação de transformadores, especialmente os de potência, é a ocorrência de perdas em seu núcleo de material ferromagnético que podem ser influenciadas por fatores construtivos e pelas condições de operação do equipamento. Dessa forma, um melhor entendimento da dinâmica de perdas no transformador é fundamental para que os seus efeitos sejam minimizados e o equipamento não cause dificuldades adicionais à operação do sistema elétrico no qual estiver inserido.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é modelar o comportamento das perdas de diversas naturezas que ocorrem nos transformadores de potência. Para isso, serão mostrados resultados de ensaios realizados em laboratório com a intenção de determinar os parâmetros do circuito equivalente, considerando a característica não-linear das curvas de histerese e da corrente de excitação.

As medições serão realizadas para diferentes condições de carga e alimentação, para tentar representar satisfatoriamente o funcionamento do transformador monofásico em regime permanente, e serão confrontadas com simulações baseadas no circuito equivalente obtido para avaliar sua exatidão.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é composto por seis capítulos, os quais são resumidos a seguir.

O Capítulo 1, no qual este item está inserido, engloba a introdução do trabalho apresentando ao leitor, a motivação que despertou o interesse pela realização deste trabalho, e os seus respectivos objetivos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão teórica sobre os princípios de funcionamento de um transformador em regime permanente e as equações para determinação dos parâmetros de seu circuito equivalente a partir de ensaios práticos.

O Capítulo 3 descreve os principais equipamentos usados nas medições, os procedimentos experimentais realizados e os respectivos resultados alcançados em laboratório.

O Capítulo 4 será usado para mostrar as simulações realizadas no *Simulink* do MATLAB na tentativa de reproduzir as medições feitas em laboratório e atestar sua validade.

No Capítulo 5 encontra-se a conclusão deste trabalho, relacionando as expectativas baseadas na teoria com os resultados obtidos a partir dos ensaios

práticos e simulações. Além disso, são feitas algumas sugestões para realização de trabalhos futuros.

Por fim, no Capítulo 6 são mostradas as referências bibliográficas que serviram como apoio para a realização deste trabalho.

2 Fundamentos Teóricos

2.1 Considerações Iniciais

Os transformadores são equipamentos de extrema importância nos sistemas elétricos, pois eles possibilitam a atuação de equipamentos de proteção e medição – TCs e TPs não são os focos do presente trabalho – ou convertem a energia para diferentes níveis de tensão, tarefa à qual se destinam os transformadores de potência, possibilitando o processo de transmissão e distribuição da eletricidade. Assim, o conhecimento das características básicas de funcionamento dos transformadores de potência é fundamental para que eles sejam operados corretamente e sejam evitados prejuízos econômicos e de segurança, seja esta humana ou da rede elétrica em que o transformador estiver ligado.

É importante lembrar que os fundamentos e ensaios aqui apresentados não abrangem a totalidade dos estudos para identificação e especificação completa de um transformador, mas apenas o necessário para a elaboração de seu circuito equivalente e cálculo de perdas.

2.2 Princípios Básicos dos Transformadores Monofásicos

Um transformador funciona segundo o fenômeno de indução mútua entre dois ou mais circuitos eletricamente isolados, mas magneticamente conectados [4]. Quando um desses circuitos, definido como enrolamento primário, é conectado a uma fonte de tensão alternada é produzido fluxo variável, cuja amplitude depende da frequência da fonte alternada, da amplitude da tensão aplicada e do número de espiras do primário. Este fluxo é concatenado pelo outro circuito, o enrolamento secundário, e induz nele tensão alternada que é determinada pela frequência, valor do fluxo enlaçado e pelo número de espiras do secundário. Vale lembrar que a

nomenclatura dos enrolamentos é apenas uma convenção, na qual o fluxo de potência ocorre do primário para o secundário, e podem haver equipamentos em que o primário é o lado de alta tensão e o secundário o lado de baixa tensão ou vice-versa, dependendo se o transformador opera como abaixador ou elevador.

A quantidade de fluxo enlaçado entre os enrolamentos depende do material presente entre as duas bobinas, ou seja, do núcleo do transformador. Assim, para aumentar o acoplamento magnético entre os enrolamentos e, conseqüentemente, a energia transferida entre eles, o núcleo dos transformadores é construído com materiais de alta permeabilidade magnética, conhecidos como ferromagnéticos.

2.3 Histerese Magnética

A característica dos materiais ferromagnéticos, que faz com que eles maximizem o acoplamento entre os enrolamentos e reduzam a corrente de excitação necessária para o funcionamento do transformador, é que eles são compostos por uma grande quantidade de regiões nas quais os momentos magnéticos dos átomos estão em paralelo. Essas regiões são conhecidas como domínios magnéticos e quando o material não está magnetizado, apesar de haver momento resultante em cada domínio separadamente, a orientação aleatória dos domínios faz com que não haja fluxo magnético resultante [1].

Se um campo magnético externo é aplicado no material, os momentos dos domínios magnéticos começam gradativamente a se alinhar com a orientação do campo e fazem com que a densidade de fluxo seja muito maior do que aquela devida apenas à força magnetomotriz aplicada. Isto é causado pelo aumento da permeabilidade efetiva do material, até o ponto em que todos os momentos magnéticos estejam alinhados segundo a orientação do campo aplicado. A partir desse ponto, por mais que a força magnética aplicada aumente, não haverá mais domínios para contribuírem com o aumento da densidade de fluxo e diz-se que o material está saturado.

Se a aplicação de força magnetizante externa cessar, os momentos dos domínios tendem a se alinhar com as direções de mais fácil magnetização próximas

à direção do campo que estava sendo aplicado. Porém, mesmo se a amplitude da força magnética externa for reduzida a zero, os momentos dos domínios magnéticos não serão mais totalmente aleatórios como eram antes do surgimento do campo magnético e restará uma magnetização líquida na direção deste campo. Este fenômeno, conhecido como histerese magnética, faz com que seja necessária a aplicação de uma força magnética em sentido contrário para que o momento magnético resultante no material se anule. Em virtude disso, a relação entre a densidade de fluxo B e o campo magnético é não linear e plurívoca, fazendo com que seja comum a representação das características do material através de gráficos conhecidos como laços de histerese. Um destes gráficos típicos está mostrado na Figura 2.1 e pode ser traçado a partir da média de curvas obtidas em ensaios experimentais realizados para diferentes amostras do material.

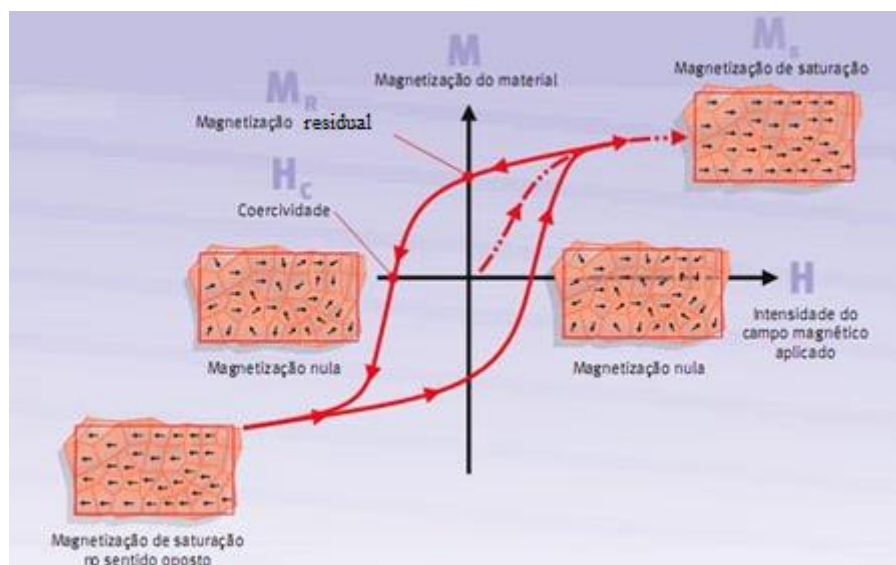


Figura 2.1 – Curva $B \times H$ para materiais ferromagnéticos [6]

2.4 Análise de um Transformador Ideal

Para facilitar as deduções e explicações dadas nesta seção sobre os transformadores, será considerado um transformador monofásico ideal. Um transformador ideal é uma abstração que não apresenta fluxo disperso nos enrolamentos, que não possui perdas ôhmicas nas suas bobinas, que não sofre perdas por histerese e correntes parasitas no núcleo, e que possui permeabilidade infinita no núcleo de forma que a força magnetomotriz necessária para produzir fluxo é insignificante. Vale ressaltar, que apesar de se tratar de uma idealização, a incorporação do conceito de transformador ideal possibilita definir uma modelagem bastante apropriada para os equipamentos reais.

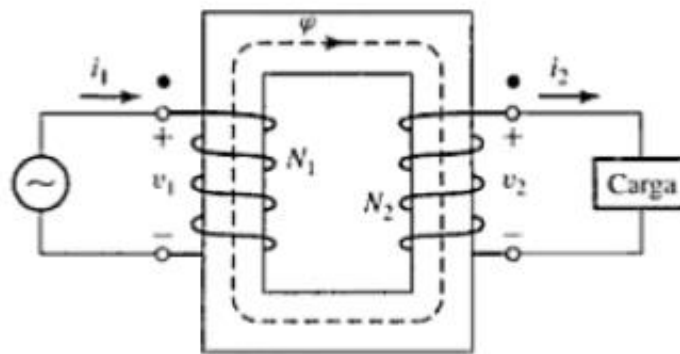


Figura 2.2 - Transformador Ideal [1]

A Figura 2.2 apresenta os sentidos de corrente e fluxo instantâneos bem como as polaridades das tensões. Assim, quando a tensão da fonte alternada tiver valor positivo, a direção da corrente i_1 produzirá fluxo mútuo φ na direção mostrada de forma que a força eletromotriz induzida no primário v_1 terá polaridade oposta à fonte e a do secundário v_2 terá polaridade positiva que criará fluxo desmagnetizante contrário ao fluxo mútuo φ .

Imagine que, inicialmente, a carga conectada no transformador tenha impedância infinita ou o secundário esteja em aberto. A corrente i_2 será nula e uma pequena corrente de regime permanente primária i_φ , conhecida como corrente de

excitação, circulará para produzir o fluxo alternado no circuito magnético que, por sua vez, induzirá uma FEM no enrolamento primário, de acordo com a Lei de Faraday, expressa por:

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.1)$$

em que,

λ_1 = fluxo concatenado pelo enrolamento primário [Wb];

N_1 = número de espiras do enrolamento primário.

$$\varphi = \phi_{max} \text{ sen } \omega t \quad (2.2)$$

A consideração de resistência nula nos enrolamentos faz com que a tensão induzida e_1 seja praticamente igual à tensão da fonte e acarretando num valor reduzido da corrente i_ϕ atrasada de 90° em relação à tensão aplicada, pois o circuito apresenta apenas o caráter indutivo das bobinas dos enrolamentos. Além disso, se a tensão de alimentação for senoidal, a forma de onda do fluxo também será. Essa afirmação fica clara considerando-se o fluxo instantâneo dado pela Equação (2.2) e ao aplicar-se a Lei de Faraday, dada pela Equação (2.1), chega-se a:

$$e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} = \omega N_1 \phi_{max} \cos \omega t \quad (2.3)$$

Na qual,

ϕ_{max} = valor máximo do fluxo;

$\omega = 2\pi f$ = velocidade angular [rad/s].

Se o valor de ω for substituído na Equação (2.3), pode-se obter o valor eficaz da FEM induzida no primário como mostrado na Equação (2.4):

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_{max} = \sqrt{2} \pi f N_1 \phi_{max} \quad (2.4)$$

Como não há queda de tensão no enrolamento, em virtude da consideração de resistência desprezível e reatância de dispersão nula, a força contra-eletromotriz é igual à tensão aplicada e pode-se mostrar que o fluxo gerado no núcleo é senoidal e seu valor máximo depende somente da tensão da fonte v_1 , sua frequência e o número de espiras do enrolamento primário. Esta relação é mostrada pela Equação (2.5):

$$\phi_{max} = \frac{V_1}{\sqrt{2} \pi f N_1} \quad (2.5)$$

Assim como no primário, o fluxo do núcleo também enlaça o enrolamento secundário e produz uma força eletromotriz e_2 . Essa tensão induzida está em fase com e_1 , pois ambas são produzidas pelo mesmo fluxo ϕ , e é igual à tensão v_2 nos terminais do enrolamento secundário, agora desprezados os efeitos da resistência e reatância de dispersão do enrolamento secundário.

Se for feito um desenvolvimento semelhante ao utilizado anteriormente para o primário chega-se às Equações (2.6) e (2.7):

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.6)$$

Na qual,

N_2 = número de espiras do enrolamento secundário.

$$E_2 = \sqrt{2} \pi f N_2 \phi_{max} \quad (2.7)$$

Dividindo-se a Equação (2.4) pela (2.7), chega-se à relação de transformação de tensões do transformador, mostrada na Equação (2.8).

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.8)$$

O próximo passo para se entender como o transformador ideal funciona é observar a sua operação com carga. Isso pode ser feito a partir da suposição de que a carga ligada nos terminais do secundário do transformador da Figura 2.2 não é mais nula.

A presença dessa carga faz com que apareça uma corrente alternada i_2 que produz uma força magnetomotriz (FMM) dada pela Equação (2.9).

$$\mathfrak{F}_2 = N_2 i_2 \quad (2.9)$$

Em que,

\mathfrak{F}_2 = Força magnetomotriz do enrolamento secundário [A.esp].

Essa FMM tende a produzir um fluxo desmagnetizante que reduz o fluxo mútuo φ e as tensões induzidas e_1 e e_2 , instantaneamente [2]. A redução causa o desequilíbrio entre e_1 e a tensão de alimentação v_1 , fazendo com que surja uma componente de corrente primária i_1 para criar uma FMM contrária àquela produzida pelo secundário e permitir a manutenção da corrente i_φ e o restabelecimento do fluxo ao seu valor inicial. A corrente total que circula no enrolamento primário i'_1 é a soma fasorial entre a corrente de carga i_1 , que apresenta ângulo de fase dependente do fator de potência da carga, e a corrente de excitação i_φ , que está em fase com o fluxo concatenado.

Assim, a análise do circuito magnético formado pelos enrolamentos e pelo núcleo do transformador fornece a seguinte relação:

$$\mathfrak{F}_t = N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathfrak{R} \varphi \quad (2.10)$$

Em que,

\mathfrak{F}_t = FMM total líquida no circuito magnético [A.esp];

\mathfrak{R} = relutância do núcleo do transformador $[\frac{A.esp}{Wb}]$.

A relutância da equação anterior é calculada como segue:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.11)$$

Na qual,

l = comprimento total do material ferromagnético no núcleo [m];

A = área da seção reta do núcleo [m²];

μ = permeabilidade magnética do material componente do núcleo $[\frac{Wb}{A.esp.m}]$.

Como na suposição de transformador ideal a permeabilidade do núcleo é infinita, a relutância do circuito magnético em (2.11) é nula. Ao ser aplicado na Equação (2.10), isso faz com que a FMM total líquida no transformador também seja nula, e fornece o seguinte resultado:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad (2.12)$$

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (2.13)$$

As equações acima comprovam que a corrente do enrolamento primário aumenta para se contrapor à FMM produzida pelo surgimento da corrente no secundário, cancelando seu efeito e resultando em FMM líquida nula no núcleo do transformador ideal. Essa propriedade está de acordo com a suposição de que a corrente de excitação necessária para gerar fluxo no transformador ideal é desprezível.

Pode-se utilizar a Equação (2.13) para obtenção da relação de transformação de correntes no transformador ideal, ou seja, a razão entre as correntes dos

enrolamentos primário e secundário. Esta relação é igual ao inverso da relação de espiras dos respectivos enrolamentos e está mostrada na Equação (2.14) a seguir:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.14)$$

Através de uma simples manipulação algébrica das Equações (2.8) e (2.14) chega-se ao seguinte resultado:

$$v_1 i_1 = v_2 i_2 \quad (2.15)$$

A Equação (2.15) representa a definição fundamental de um transformador como dispositivo que transfere energia de um circuito para outro. Em um transformador ideal, que não apresenta perdas ou mecanismos de armazenamento de energia, a potência instantânea drenada da fonte alternada é transferida para o secundário e entregue à carga. Essa equação também estabelece um meio de especificar um transformador através da sua potência nominal (VA), em que v_1 e i_1 são, respectivamente, os valores nominais da tensão e corrente primárias e v_2 e i_2 são os valores nominais do secundário [2].

Uma última propriedade do transformador ideal que é útil para a análise do equipamento real é a transformação de impedâncias. Ela será mostrada a partir do circuito da Figura 2.2, considerando a carga como uma impedância z_2 [Ω].

Se as equações (2.8) e (2.14) forem rearranjadas e colocadas na forma fasorial, elas podem ser expressas como segue:

$$\dot{V}_1 = \frac{N_1}{N_2} \dot{V}_2 \quad \dot{V}_2 = \frac{N_2}{N_1} \dot{V}_1 \quad (2.16)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \quad \dot{I}_2 = \frac{N_1}{N_2} \dot{I}_1 \quad (2.17)$$

As equações anteriores podem ser divididas entre si, fornecendo:

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{\dot{V}_2}{\dot{I}_2} \quad (2.18)$$

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 \quad (2.19)$$

O resultado acima mostra como a impedância de uma carga conectada nos terminais do secundário do transformador pode ser representada por uma impedância equivalente refletida para o circuito do enrolamento primário ou vice-versa, a partir do quadrado da relação de espiras.

2.5 O Transformador Real

Como dito anteriormente, o transformador ideal é uma abstração que, apesar de servir satisfatoriamente para a demonstração dos princípios de funcionamento do equipamento, não pode ser usado para modelar a operação de um transformador nas diferentes situações às quais ele estará sujeito. Por melhor que sejam os processos e materiais empregados na construção de um transformador é impossível torná-lo livre de perdas, sejam elas ôhmicas ou de histerese, e de fluxos de dispersão nos enrolamentos. Por isso, devem ser feitas as modificações necessárias no modelo ideal para que ele possa ser eficiente nos estudos de transformadores usados na prática.

Um modelo mais elaborado de um transformador deve levar em consideração os efeitos das resistências dos enrolamentos, dos fluxos dispersos e das correntes finitas de excitação devidas à permeabilidade finita e não-linear do núcleo. Em alguns casos, mesmo as capacitâncias dos enrolamentos apresentam efeitos importantes, notadamente em problemas que envolvem o comportamento do transformador em frequências acima da faixa de áudio, ou durante condições transitórias com variações muito rápidas, como as encontradas em transformadores de sistemas de potência, resultantes de surtos de tensão causados por descargas atmosféricas ou transitórios de manobra [5].

2.5.1 Resistências dos Enrolamentos

As resistências elétricas dos condutores constituintes dos enrolamentos primário e secundário do transformador, representadas por R_1 e R_2 , respectivamente, na Figura 2.3, influenciam no funcionamento do equipamento por causa de dois efeitos: perda de energia por efeito Joule e queda de tensão.

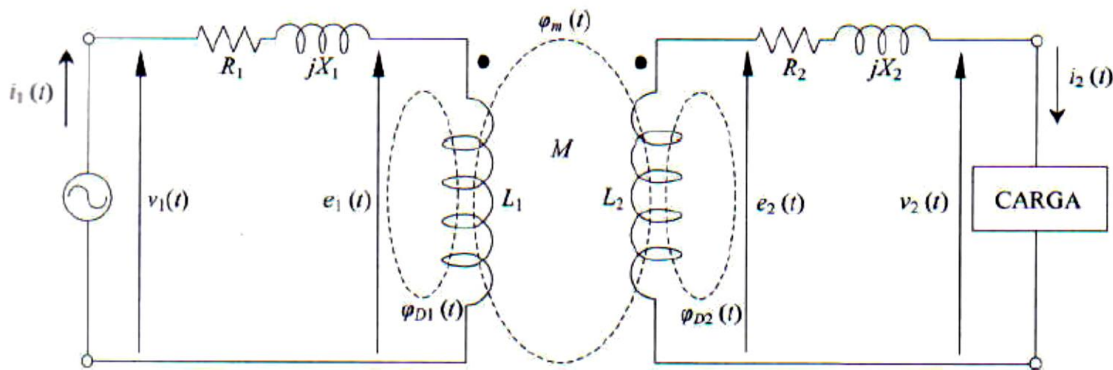


Figura 2.3 – Resistências e reatâncias de um transformador

Para minimizar a ação das perdas por efeito Joule e também reduzir o custo do transformador, os enrolamentos são confeccionados com condutores de seção adequada ao seu nível de corrente nominal, fazendo com que os valores de resistência sejam os menores possíveis. O enrolamento de alta tensão que, teoricamente, possui menor corrente, apresenta muitas espiras com uma bitola inferior à do enrolamento de baixa tensão. Já o de baixa tensão é enrolado com poucas espiras de um condutor com maior bitola em relação ao primário.

Apesar da resistência do enrolamento de alta ser, geralmente, maior que a resistência do enrolamento de baixa tensão, os condutores são escolhidos proporcionalmente às correntes de seus enrolamentos para que as perdas no cobre em ambos sejam aproximadamente iguais.

2.5.2 Reatâncias de dispersão

Em oposição ao que acontece com o transformador idealizado, no transformador real nem todo o fluxo enlaçado por um dos enrolamentos é o fluxo mútuo que fica confinado ao núcleo (fluxo φ_m na Figura 2.3), concatenando ambos os enrolamentos. Existe uma parcela, conhecida como fluxo disperso, que fecha o seu caminho magnético pelo ar e concatena apenas um dos enrolamentos (fluxos φ_{D1} e φ_{D2} na Figura 2.3). Para facilitar o entendimento, essas componentes estão esquematicamente representadas na Figura 2.4, na qual o primário e o secundário estão enrolados em colunas diferentes do núcleo.

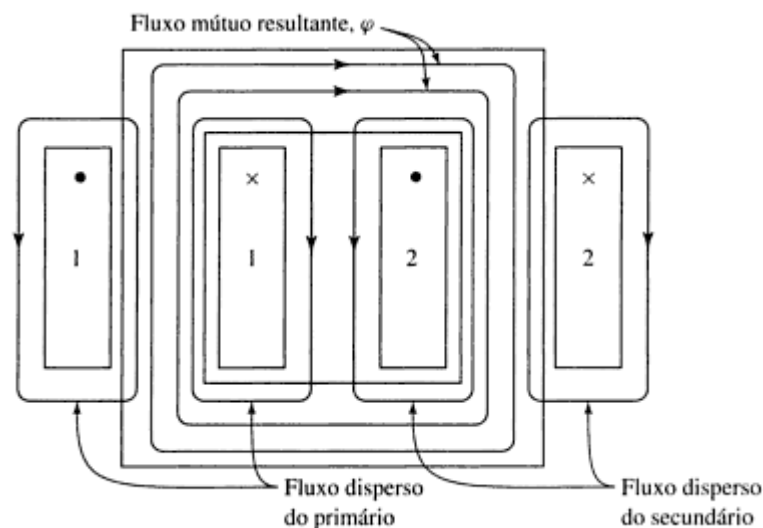


Figura 2.4 – Vista esquemática dos fluxos mútuo e disperso de um transformador [1]

O fluxo mútuo resultante φ fica efetivamente canalizado no núcleo e, portanto, concatena os dois enrolamentos. Como mostrado na Equação (2.10), esse fluxo útil é criado pela combinação das FMMs do primário e secundário e é o responsável pela transferência de energia entre os dois enrolamentos [4].

O fluxo disperso do primário, representado pelas linhas que saem do núcleo e se fecham no ar na Figura 2.4, não concatena o enrolamento secundário. Como a maior parte deste fluxo se desenvolve no ar, ele não está sujeito ao fenômeno de

saturação do ferro e varia linearmente com a corrente de primário i_1 que o produz, ou seja:

$$\varphi_{d1} = L_1 i_1 \quad (2.20)$$

O coeficiente L_1 é a indutância de dispersão do primário [H] e corresponde à seguinte reatância de dispersão do primário [Ω]:

$$X_{d1} = \omega L_1 = 2\pi f L_1 \quad (2.21)$$

Quando existe uma carga conectada aos terminais do secundário, surge uma corrente i_2 que, além de produzir a FMM desmagnetizante que deve ser compensada pelo aumento da corrente primária para manter inalterado o fluxo mútuo do núcleo, também produz um fluxo disperso de secundário que se fecha diretamente no ar ao redor do enrolamento e não enlaça o primário [4]. De forma análoga ao que acontece com o enrolamento primário, esse fluxo é proporcional à corrente que o produz e pode ser representado pela indutância [H] e reatância de dispersão do secundário [Ω], como mostrado a seguir:

$$\varphi_{d2} = L_2 i_2 \quad (2.22)$$

$$X_{d2} = \omega L_2 = 2\pi f L_2 \quad (2.23)$$

2.5.3 Relação de Transformação

Considerando-se o circuito mostrado na Figura 2.3, como o fluxo total enlaçado pelo enrolamento primário φ_1 é dado pela soma do fluxo disperso no primário φ_{d1} com o fluxo mútuo que percorre o núcleo φ_m , a FEM induzida neste enrolamento, calculada pela Lei de Faraday, é composta por duas parcelas como mostrado na Equação (2.24) a seguir:

$$e_1 = N_1 \frac{d\varphi_m}{dt} + N_1 \frac{d\varphi_{d1}}{dt} \quad (2.24)$$

Um desenvolvimento análogo pode ser feito para o enrolamento secundário e resulta na seguinte relação:

$$e_2 = N_2 \frac{d\varphi_m}{dt} + N_2 \frac{d\varphi_{d2}}{dt} \quad (2.25)$$

Se o núcleo de ferro for bem projetado e apresentar permeabilidade magnética bastante elevada, os fluxos dispersos nos enrolamentos correspondem a uma pequena porção do fluxo total, entre 4% e 7% quando o transformador opera em condições nominais [11], e podem ser desprezados se comparados com o fluxo mútuo.

Assim, a relação de transformação real poderá ser aproximada pela Equação (2.26) a seguir:

$$\frac{e_1}{e_2} \cong \frac{N_1 \frac{d\varphi_m}{dt}}{N_2 \frac{d\varphi_m}{dt}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.26)$$

Essa equação mostra que as tensões induzidas, pela variação do fluxo mútuo, em cada enrolamento são diretamente proporcionais ao respectivo número de espiras. Esse resultado é exatamente igual à relação de transformação do transformador ideal mostrado anteriormente.

2.5.4 Corrente de Excitação

Como já foi mostrado na Seção 2.4, a corrente do primário é responsável não só por fornecer a corrente para uma eventual carga que esteja conectada, mas também por produzir a magnetização do material ferromagnético do núcleo, sem a qual o transformador não funcionaria. Por isso é interessante dividir a corrente oriunda da fonte de tensão em duas componentes: a componente de carga que

compensa a FMM produzida pela corrente do secundário; e a componente de excitação i_φ .

O fluxo do núcleo depende da tensão senoidal aplicada, como foi mostrado na Equação (2.5), e tem forma de onda senoidal. Mas a corrente de excitação necessária para produzir esse fluxo é determinada pelas propriedades magnéticas do núcleo e a sua forma de onda difere de uma senóide [1].

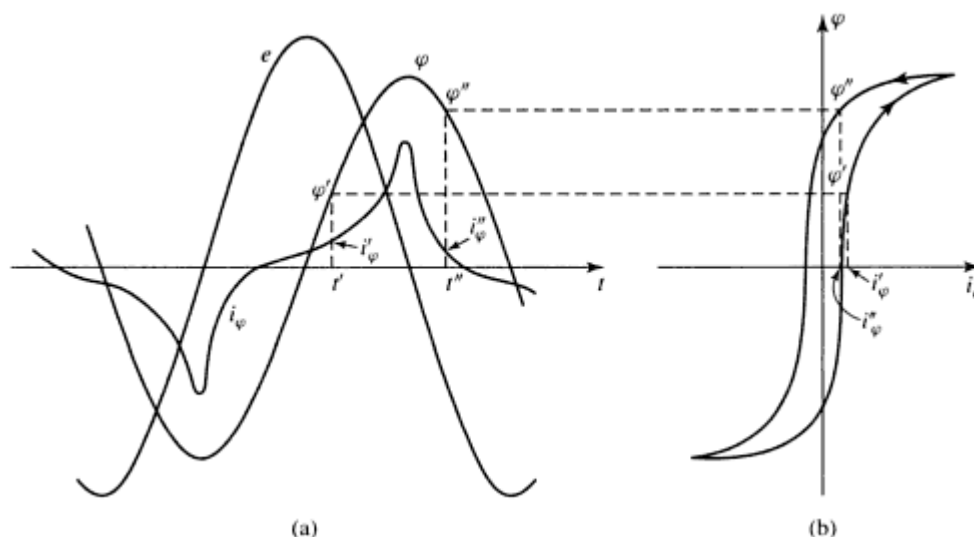


Figura 2.5 – (a) Ondas de tensão, fluxo e corrente de excitação de um transformador; (b) Laço de histerese do material do núcleo correspondente [1]

Na Figura 2.5, é possível observar a forma de onda da corrente de excitação em regime permanente que é distorcida em relação às ondas senoidais de tensão e fluxo mútuo. Além disso, é possível perceber como o valor de corrente de excitação está relacionado ao laço de histerese do núcleo.

O motivo da corrente de excitação não ser senoidal é a presença de componentes harmônicas ímpares causadas pela saturação do núcleo do transformador que aumenta com a elevação da tensão aplicada ao enrolamento primário [7]. A principal componente harmônica é a terceira e, para transformadores típicos, ela costuma representar cerca de 40% da corrente de excitação.

A componente fundamental pode ser decomposta em duas componentes fasoriais: uma em fase com a força contra-eletromotriz (FCEM) induzida nos enrolamentos e a outra com 90° de atraso em relação à FCEM.

A parcela da componente fundamental da corrente de excitação, que está defasada de 90° em relação à FCEM, é conhecida como corrente de magnetização \dot{I}_m , sendo responsável pela produção do fluxo útil que atravessa o núcleo.

Já a componente em fase, conhecida como corrente de perdas no núcleo \dot{I}_c é responsável pela potência ativa que é consumida em virtude das perdas por histerese e correntes de Foucault [2].

Nos transformadores de potência operando em condições nominais de carga a corrente de excitação representa uma pequena fração da corrente total e, por isso, muitas vezes os efeitos das componentes harmônicas são omitidos e \dot{I}_φ é representada como uma corrente senoidal composta pela soma de suas duas componentes fundamentais \dot{I}_c e \dot{I}_m para facilitar as análises. No entanto, como o presente trabalho visa avaliar o comportamento da corrente de excitação, tanto em regime transitório como permanente, os harmônicos não serão desprezados.

2.5.5 Reatância e Resistência do Núcleo

O núcleo de um transformador pode ser representado como uma impedância, composta por uma resistência e uma reatância, que é atravessada pela corrente de excitação i_φ . A componente resistiva R_c , chamada de resistência de perdas no núcleo, juntamente com a componente de corrente \dot{I}_c , é responsável pelas perdas por histerese e correntes parasita.

As perdas por histerese magnética ocorrem em virtude da energia dissipada pela força magnética exigida para orientação dos domínios magnéticos do núcleo, como foi explicado na Seção 2.3, e ocorrem ciclicamente a cada vez que o laço de histerese é percorrido.

Já as perdas por correntes parasitas ou correntes de Foucault são perdas por Efeito Joule. Elas ocorrem devido à passagem de campo magnético variável no

tempo (fluxo variável) no material ferromagnético que gera campos elétricos e, consequentemente, induz correntes indesejadas no interior do núcleo do transformador [3]. Para tentar reduzir as perdas por correntes de Foucault os fabricantes costumam laminar o material do núcleo e separar essas lâminas por meio de isolantes. Na Figura 2.6 é possível visualizar que a área disponível para a circulação das correntes parasitas (representadas pelas linhas circulares) e, consequentemente, a resistência no núcleo laminado é maior em relação ao núcleo sólido, diminuindo as perdas.

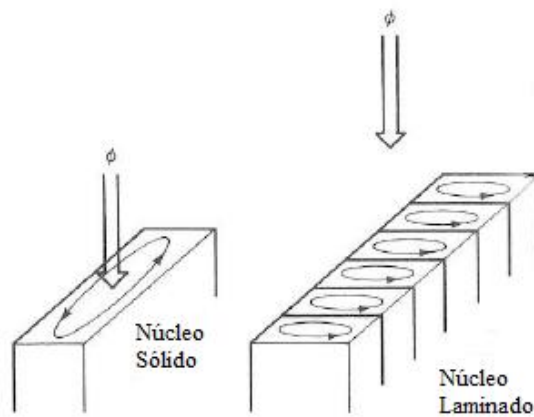


Figura 2.6 – Comparação entre as Correntes de Foucault de um núcleo sólido e de outro laminado [8]

Finalmente, a componente reativa da impedância, chamada de reatância de magnetização X_m , é responsável pelo estabelecimento do fluxo magnético no núcleo do transformador em conjunto com a corrente de magnetização \dot{I}_m . Essa reatância varia com a saturação do núcleo, porém, como geralmente é especificada para condições nominais de tensão e frequência, pode-se supor que seu valor permanecerá constante para operação normal [5], como mostrado na Equação (2.24) a seguir:

$$X_m = 2\pi f L_m \quad (2.24)$$

2.5.6 Polaridade

A marcação da polaridade nos terminais dos enrolamentos de um transformador monofásico indica quais são os terminais positivos e negativos em

um determinado instante, isto é, a relação entre os sentidos momentâneos das FEMs nos enrolamentos primário e secundário em relação aos seus ângulos de fase.

Para facilitar a identificação da polaridade em transformadores, utiliza-se a simbologia do ponto em um dos terminais dos enrolamentos, conforme mostrado na Figura 2.3. O ponto identifica, em cada enrolamento, os terminais de polaridade instantânea positiva. Quando dois terminais de enrolamentos diferentes estiverem identificados pelo ponto, significa que possuem a mesma polaridade instantânea, ou seja, as tensões terminais destes enrolamentos estarão em fase.

A polaridade dos transformadores depende fundamentalmente de como são enroladas as espiras e pode ser aditiva ou subtrativa. Na polaridade subtrativa não existe defasagem angular entre as tensões primária e secundária. Na polaridade aditiva a defasagem angular entre as tensões primária e secundária é de 180° . O conhecimento da polaridade é indispensável para a ligação dos transformadores em bancos, operação em paralelo e ligação correta dos instrumentos de medição e proteção [7].

2.5.7 Circuito Equivalente

Com base no desenvolvimento feito ao longo desta seção, é possível desenvolver um circuito equivalente para modelar o funcionamento de um transformador real.

O sinal senoidal aplicado pela fonte de alimentação sofre quedas de tensão na resistência do enrolamento primário ($I_1 R_1$) e a causada pela dispersão de fluxo neste enrolamento ($I_1 X_{d1}$), fazendo com que a FEM induzida no primário \dot{E}_1 seja inferior à tensão \dot{V}_1 nos terminais.

A corrente \dot{I}_1 então se divide na componente de excitação \dot{I}_ϕ que atravessa o ramo *shunt* e que, por sua vez, se subdivide nas componentes de perdas no núcleo \dot{I}_c e de magnetização \dot{I}_m , e na componente de carga \dot{I}'_2 que fornece a FMM necessária a compensar o efeito da carga conectada nos terminais do secundário.

O ramo *shunt* ou em derivação é colocado após o enrolamento primário e é composto pela resistência de perdas no núcleo R_c em paralelo com a reatância de

magnetização X_m . Como as perdas no núcleo por correntes parasitas são causadas pela variação de fluxo mútuo no tempo elas são proporcionais à FEM induzida e podem ser calculadas por:

$$P_c = \frac{E_1^2}{R_c} \quad (2.25)$$

O resultado da consideração das perdas por correntes de Foucault no núcleo apresenta influência sobre o laço de histerese, como se pode perceber através da Figura 2.7. O laço mais a direita é a composição entre a elipse da esquerda, correspondente às perdas por aquecimento em virtude da indução de corrente no ferro, e o laço do centro que nada mais é do que o laço de histerese original, se não existissem perdas por correntes parasitas. Esse alargamento do laço ocorre porque para um mesmo valor de fluxo mútuo atravessando o núcleo existe uma corrente mais elevada sendo drenada da fonte de tensão, ou seja, $i_\phi = i_m + i_c$.

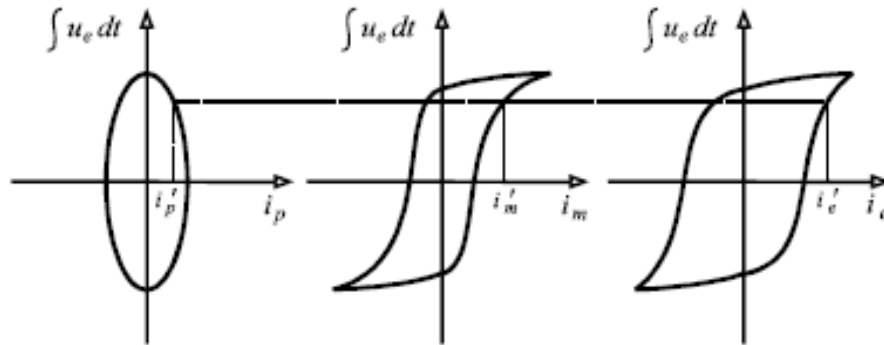


Figura 2.7 - Influência das perdas no núcleo sobre o laço de histerese [10]

A representação das perdas no ferro pode se tornar desnecessária, pois, se a tensão aplicada ao transformador alcançar valores muito elevados e causar a operação na região saturada, o alargamento do laço de histerese na região não saturada pode ser desprezível se comparado à grande variação de corrente que ocorre na região de saturação.

Como as perdas e o processo de excitação do núcleo são representados pelo ramo *shunt*, a transferência de energia entre primário e secundário pode ser representada por um transformador ideal no circuito equivalente.

Finalmente, basta inserir a resistência R_2 do enrolamento secundário e a reatância de dispersão X_{d2} para representar as quedas de tensão, causadas pela corrente \hat{I}_2 , entre a FEM induzida no enrolamento \hat{E}_2 e a tensão \hat{V}_2 disponibilizada para a carga nos terminais do secundário.

A Figura 2.8 mostra o circuito equivalente de um transformador e os valores dos parâmetros podem ser refletidos para um ou outro enrolamento com o objetivo de facilitar cálculos nos estudos sobre a operação do equipamento.

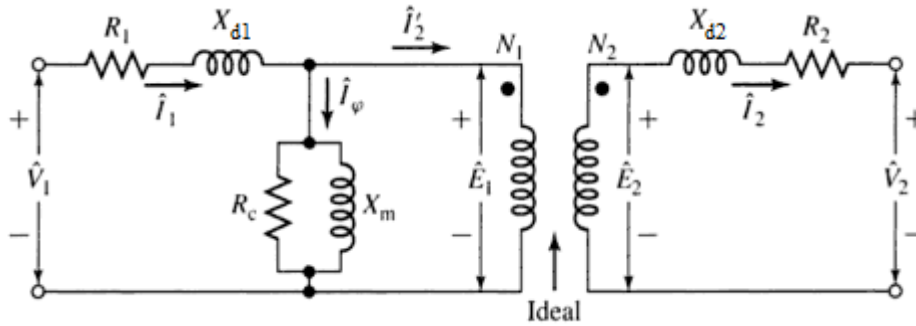


Figura 2.8 – Circuito Equivalente do transformador [1]

2.5.8 Funcionamento com Carga

Considerando-se o circuito equivalente da Figura 2.8 pode-se calcular as correntes que circulam no transformador e, a partir delas, traçar-se o diagrama fasorial para os diferentes tipos de carga.

Se uma carga elevada Z_L for conectada nos terminais do secundário do transformador, a corrente de excitação será relativamente desprezível e, por isso, o ramo *shunt* pode ser desconsiderado para facilitar a visualização do diagrama fasorial. Assim, as impedâncias série dos enrolamentos podem ser somadas, contanto que estejam refletidas para o mesmo enrolamento, e a corrente do primário pode ser calculada como:

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{V}_1}{\hat{Z}_{eq} + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \hat{Z}_L} = \frac{\hat{V}_1}{(R_{eq} + jX_{eq}) + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 (R_L \pm jX_L)} \quad (2.26)$$

Na qual,

$+jX_L$ representa a reatância da carga se esta for indutiva;

$-jX_L$ representa a reatância da carga se esta for capacitiva.

A simplificação feita ao desconsiderar-se a corrente de excitação que atravessa o núcleo faz com que o ângulo de carga da corrente nos terminais do enrolamento secundário seja o mesmo da corrente primária. Se a corrente do ramo em derivação estivesse presente haveria uma defasagem, muito pequena, entre a corrente refletida do secundário e a corrente do primário.

Os três diagramas mostrados na Figura 2.9 representam as condições possíveis de operação do transformador carregado. Neles, α representa a relação de transformação $\frac{N_1}{N_2}$ usada para referir as grandezas do enrolamento secundário para o primário.

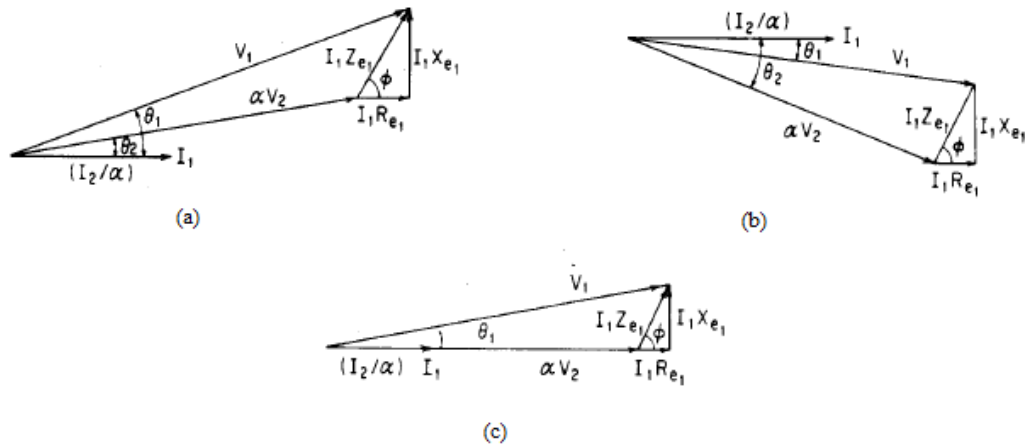


Figura 2.9 - Diagrama fasorial para diferentes tipos de carga: (a) indutiva; (b) capacitiva e (c) puramente resistiva [2]

A seguir faz-se uma breve análise de cada uma dessas situações:

- No caso (a) o fator de potência da carga está em atraso e a corrente refletida do secundário I_2/α , tomada como referência e igual à I_1 , possui uma diferença de fase θ_2 em relação à tensão referida αV_2 . Se

for somada a tensão de secundário refletida à queda de tensão na impedância equivalente Z_{e1} , composta pela queda na resistência R_{e1} em fase com I_1 e pela queda na reatância X_{e1} que se adianta 90° em relação à I_1 , chega-se à tensão de alimentação do primário V_1 . Como o transformador tem característica altamente indutiva, o ângulo de fase da corrente primária θ_1 tende a ser maior que o da corrente secundária θ_2 ;

- O caso (b) diferencia-se do anterior porque a corrente de carga está adiantada em relação à tensão secundária, fazendo com que a tensão nos terminais do primário também esteja adiantada em relação à corrente que ela produz. Em virtude do transformador ser basicamente um indutor, o ângulo θ_1 será sempre menor que o ângulo de avanço da carga θ_2 ;
- No caso (c) o fator de potência unitário da carga faz com que a única defasagem entre as tensões de primário e secundário seja causada pela queda de tensão na impedância equivalente Z_{e1} . A pequena defasagem é representada pelo ângulo θ_1 entre a tensão e a corrente do enrolamento primário.

2.6 Ensaios para Especificação do Transformador

Os ensaios de laboratório que serão mostrados na sequência são utilizados para determinar os parâmetros do circuito equivalente e especificar as condições de funcionamento do transformador em condições nominais de operação.

2.6.1 Ensaio a Vazio

O objetivo deste ensaio é a obtenção do módulo da corrente de excitação, da relação de transformação do transformador e das perdas no núcleo, através da medição da resistência de perdas R_c e da reatância de magnetização X_m .

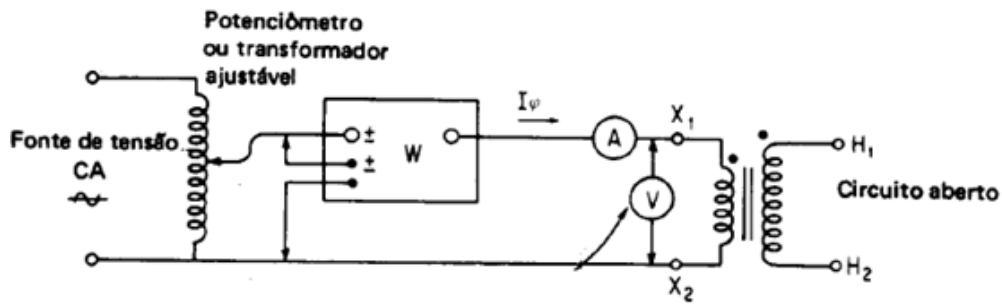


Figura 2.10 – Ligações típicas dos instrumentos para o ensaio a circuito aberto [2]

O ensaio é realizado com os terminais de um dos enrolamentos em aberto enquanto tensão nominal é aplicada no outro enrolamento. Normalmente, a tensão é aplicada ao lado de baixa tensão para facilitar a escolha dos aparelhos de medição utilizados, que estarão sujeitos a níveis pequenos de tensão primária e corrente secundária por motivos de segurança, pois correntes mais elevadas circulam no primário e no caso de alguma pessoa entrar em contato com os terminais em aberto do secundário estará sujeito a uma corrente menor. Um esquema do ensaio, mostrando a disposição dos equipamentos de medição, está apresentado na Figura 2.10.

A razão da aplicação de tensão nominal é que o fluxo mútuo produzido que atravessa o núcleo tem praticamente a mesma amplitude daquele que um transformador operando com carga e tensão nominais. Isso faz com que a corrente gerada seja igual à corrente de excitação.

$$Z_{ca} = R_1 + jX_{d1} + \frac{R_c(jX_m)}{R_c + jX_m} \quad (2.27)$$

A rigor, a impedância total do circuito equivalente, mostrado na Figura 2.8, com o secundário em aberto seria dada pela Equação (2.27). Mas como normalmente os valores R_c e X_m da impedância de magnetização são muito superiores à impedância do primário ($R_1 + jX_{d1}$), a queda de tensão no primário pode ser desprezada e a FEM induzida é considerada idêntica à tensão aplicada V_{ca} .

Por isso, é possível chegar-se a relação de espiras do transformador diretamente da medição das tensões nos terminais de ambos os enrolamentos.

Além disso, como a corrente de excitação I_{ca} que circula pelo equipamento durante a realização do ensaio representa uma porção ínfima da corrente nominal, a perda de potência ativa no cobre do primário é desconsiderada e a potência medida no ensaio P_{ca} é interpretada como sendo o total das perdas no núcleo. Assim, os valores de R_c e X_m são calculados a partir das equações a seguir:

$$R_c = \frac{V_{ca}^2}{P_{ca}} \quad (2.28)$$

$$|Z_\phi| = \frac{V_{ca}}{I_{ca}} \quad (2.29)$$

$$X_m = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{|Z_\phi|}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_c}\right)^2}} \quad (2.30)$$

É possível, também, calcular o fator de potência FP do circuito como mostrado a seguir:

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{ca}}{V_{ca} I_{ca}} \quad (2.31)$$

2.6.2 Ensaio de Curto-Circuito

O ensaio de curto-circuito visa à determinação das perdas no cobre, das resistências dos enrolamentos (R_1 e R_2), reatâncias de dispersão (X_{d1} e X_{d2}) e quedas de tensão nos enrolamentos.

Este ensaio consiste em aplicar um curto no enrolamento de baixa tensão e alimentar o enrolamento de alta tensão com uma fonte de tensão senoidal. Embora seja arbitrária a escolha do enrolamento posto em curto, é conveniente que a alimentação seja feita pelo enrolamento de alta tensão, no qual circulam correntes menores, o que

reduz a corrente exigida da fonte de alimentação e a capacidade exigida dos instrumentos de medição de corrente.

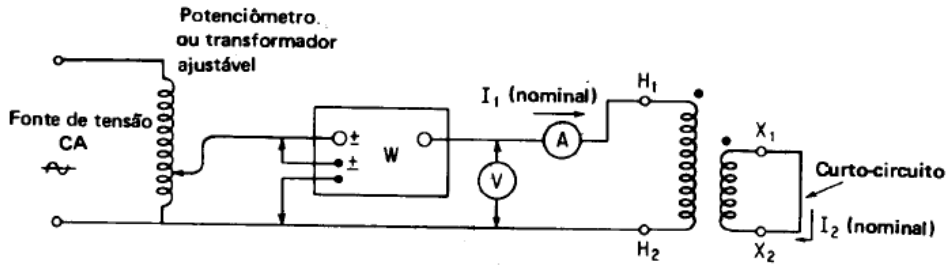


Figura 2.11 - Ligações típicas dos instrumentos para o ensaio de curto-circuito [2]

Um esquema do ensaio, mostrando a disposição dos equipamentos de medição, está apresentado na Figura 2.11.

Em virtude da baixa impedância série do circuito equivalente, se fosse aplicada a tensão nominal ao enrolamento de alta tensão, com o enrolamento de baixa tensão em curto, não circulariam as correntes nominais, mas as correntes elevadas de curto-circuito. Assim, a tensão que necessita ser aplicada na realização do ensaio, para que ocorra circulação de correntes nominais nos enrolamentos, apresenta valores inferiores a 15% da tensão nominal de operação [5].

$$Z_{cc} = R_1 + jX_{d1} + \frac{Z_\varphi(R_2 + jX_{d2})}{Z_\varphi + R_2 + jX_{d2}} \quad (2.32)$$

A impedância total do circuito equivalente vista do primário com o secundário em curto seria dada pela Equação (2.32), mas, como a impedância do ramo *shunt* Z_φ é muito superior à impedância do enrolamento secundário ($R_2 + jX_{d2}$), ela pode ser simplificada como:

$$Z_{cc} = Z_{eq} = R_1 + jX_{d1} + R_2 + jX_{d2} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (2.33)$$

Na verdade, como a corrente de excitação é desprezível em comparação com a corrente do primário I_1 medida, o ramo *shunt* acaba sendo desconsiderado para o

cálculo das perdas no cobre P_{cc} e da impedância equivalente dos enrolamentos neste ensaio. Logo, os valores de R_{eq} e X_{eq} são calculados a partir das medições de corrente, tensão e potência ativa como expressos pelas equações abaixo:

$$|Z_{eq}| = |Z_{cc}| = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (2.34)$$

$$R_{eq} = R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (2.35)$$

$$X_{eq} = X_{cc} = \sqrt{|Z_{cc}|^2 - R_{cc}^2} \quad (2.36)$$

Se forem desejados os valores das resistências e reatâncias individuais de cada enrolamento, pode-se supor com precisão satisfatória que $R_1 = R_2 = 0,5R_{eq}$ e $X_{d1} = X_{d2} = 0,5X_{eq}$. Vale ressaltar que nessa aproximação todos os valores devem estar refletidos para o mesmo enrolamento.

3 Procedimentos Experimentais e Resultados

3.1 Considerações Iniciais

No presente capítulo são exibidos todos os ensaios realizados e os equipamentos utilizados para obtenção dos dados que permitem validar a teoria demonstrada anteriormente.

O transformador de potência ensaiado pertence ao Laboratório de Máquinas do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRJ e está mostrado na Figura 3.1.

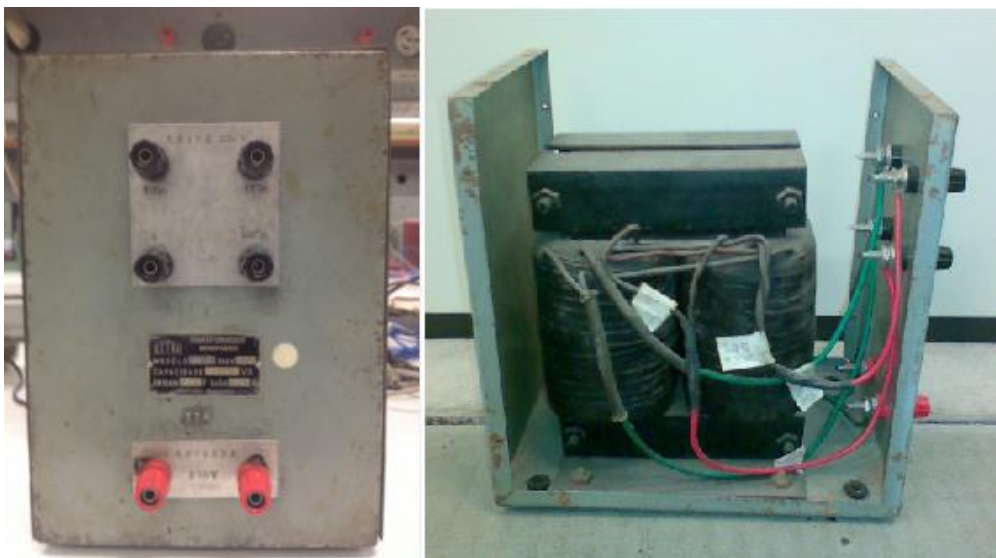


Figura 3.1 – Vista dos terminais e das ligações dos enrolamentos do transformador ensaiado

Os dados de placa e as dimensões do núcleo do material ferromagnético, obtidas através de medições com um paquímetro, estão descritos na Tabela 3.1.

Este transformador apresenta dois enrolamentos, sendo que um deles possui três tapes com respectivas tensões de 50%, 86% e 100% em relação à tensão aplicada ao outro enrolamento. Desta forma, se for aplicada a alimentação nominal de 220 V no enrolamento sem tapes pode-se obter tensões de 110 V; 189,2 V ou 220 V de acordo com o tape utilizado no secundário. A verificação dessas proporções de tapes, indicadas na carcaça do equipamento, foi feita através da

aplicação de um pequeno sinal de tensão no enrolamento com tape único e medição dos diferentes valores nos pares de terminais do enrolamento com tapes múltiplos. As medições foram condizentes com as marcações nos terminais e, ao longo dos experimentos que serão desenvolvidos, será sempre utilizado o tape máximo do enrolamento, ou seja, 100%.

Tabela 3.1 - Dados do Transformador Ensaiado

Transformador Monofásico	
Patrimônio	44424
Potência	1 kVA
Tensão de Entrada	220 V
Tensão de Saída	110 V; 189,2 V; 220 V
Seção Reta do Núcleo	32,8 cm ²
Comprimento do Núcleo	51 cm

É importante destacar que antes da execução das medições relativas a este trabalho foram executados alguns testes para assegurar o correto funcionamento do equipamento. O primeiro foi o teste de continuidade, no qual foi utilizado um multímetro para verificação da integridade dos enrolamentos e do isolamento do transformador. Depois foi realizado o teste de polaridade, através do método de corrente alternada, com a finalidade de atestar se a polaridade da conexão das bobinas era aditiva ou subtrativa, chegando-se a conclusão de que a mesma é subtrativa.

Passou-se então à realização dos ensaios de curto-circuito e a vazio para determinação dos parâmetros do circuito equivalente do transformador em regime permanente, da curva de saturação do núcleo e para medição da corrente de excitação do equipamento utilizado.

Na sequência, foi utilizado o método apresentado em [5] para aquisição do ciclo de histerese através da utilização de um circuito integrador RC.

Finalmente, foram feitas medições de potência instantânea nos dois enrolamentos, para diferentes condições de alimentação e carga, na tentativa de avaliar o comportamento das perdas no núcleo do transformador em regime permanente.

3.2 Equipamentos Utilizados

O principal aparelho de medições utilizado no laboratório foi um osciloscópio digital TPS 2012 da Tektronix, pertencente ao Laboratório de Máquinas. A vista frontal deste osciloscópio é apresentada na Figura 3.2. Ele possui dois canais isolados que permitem a obtenção de dados de forma independente com largura de banda de 100 MHz e taxa de amostragem de 1 GS/s para ambos os canais [12].

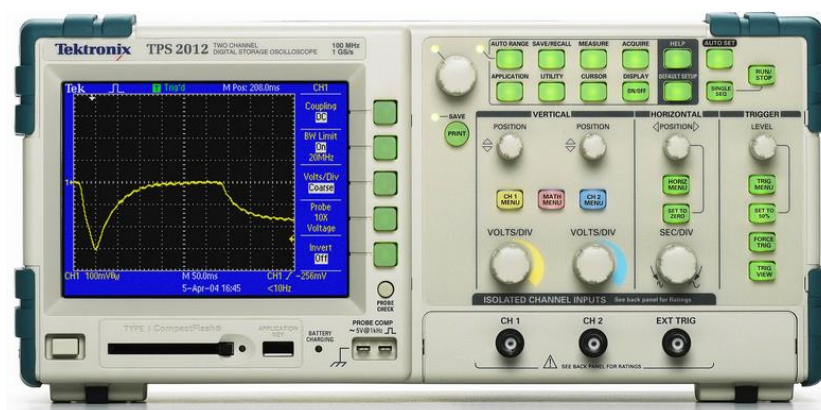


Figura 3.2 – Osciloscópio TPS 2012

Dentre as funcionalidades do equipamento, as utilizadas para a realização deste trabalho foram o aplicativo para medição de potência instantânea, a partir da composição dos sinais oriundos dos dois canais, e a função de cálculo da FFT (*Fast Fourier Transformer*) que serviu para visualizar as componentes harmônicas de alguns sinais.

A aquisição dos dados e formas de onda resultantes das medições foi feita com um computador, conectado à porta RS-232 do osciloscópio através de um conversor Serial-USB, utilizando o software WSTRO (*Wavestar Software for Oscilloscopes*).

Também foi utilizado um multímetro BK Tool Kit 2707A para os testes de polaridade, continuidade e aferição dos tapes, citados anteriormente, bem como na medição dos valores de resistência que serão discutidos posteriormente.

3.3 Ensaio de Curto-circuito

Como se utilizou um osciloscópio para execução dos ensaios, não foram necessários wattímetro, voltímetro e amperímetro. Porém, o esquema de medição foi semelhante ao mostrado na Figura 2.11, com uma ponta de prova de tensão conectada a um canal e a de corrente ao outro, e para aplicação de alimentação ajustável foi utilizado um *variac*. Os valores medidos e os resultados calculados a partir das Equações (2.33), (2.34) e (2.35) estão expostos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Ensaio de Curto-circuito

$I_{cc} [A_{rms}]$	$V_{cc} [V_{rms}]$	$P_{cc} [W]$	$Q [Var]$	$f.p.$	$ Z_{eq} [\Omega]$	$R_{eq} [\Omega]$	$X_{eq} [\Omega]$
0,48	0,65	0,26	0,09	0,945	1,354	1,128	0,749
0,84	1,07	0,83	0,22	0,966	1,274	1,176	0,489
1,12	1,37	1,46	0,44	0,957	1,223	1,164	0,375
1,72	2,13	3,27	0,65	0,981	1,238	1,105	0,558
2,03	2,62	4,82	1,06	0,977	1,291	1,170	0,546
2,34	3,00	6,43	1,42	0,976	1,282	1,174	0,515
2,63	3,51	7,61	1,65	0,977	1,335	1,100	0,756
3,32	4,02	10,50	2,25	0,978	1,211	0,953	0,823
3,62	4,54	16,21	3,75	0,974	1,254	1,237	0,206
3,88	4,98	18,43	4,73	0,969	1,283	1,224	0,148
4,25	5,38	22,70	4,90	0,977	1,266	1,257	0,152
4,53	6,00	25,50	5,52	0,977	1,324	1,243	0,458
5,08	6,56	31,80	6,82	0,978	1,291	1,232	0,386
5,97	7,03	36,40	7,98	0,977	1,178	1,021	0,669
6,29	7,84	46,60	9,91	0,978	1,246	1,178	0,297

A partir da Tabela 3.2 e da Figura 3.3, que mostra os pontos experimentais obtidos no ensaio e a reta que melhor se ajusta a eles, é possível perceber a linearidade no funcionamento do transformador sob as condições do ensaio de curto. Isto prova que não ocorre saturação porque, como foi explicado no Capítulo 2, o ramo de magnetização pode ser desconsiderado. Além disso, o elevado fator

de potência evidencia a predominância da resistência dos enrolamentos em relação às reatâncias de dispersão dos mesmos.

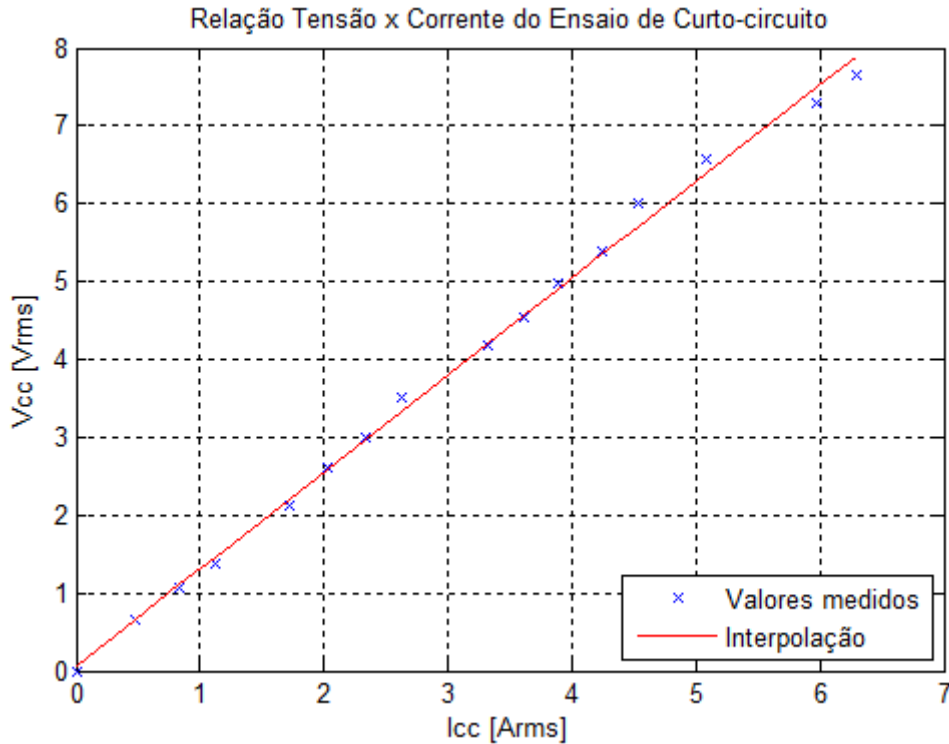


Figura 3.3 - Reta obtida do Ensaio de Curto-circuito

Vale destacar que no cálculo dos parâmetros do circuito equivalente serão utilizados os dados obtidos na situação com corrente mais próxima da nominal, ou seja, os valores referentes a $I_{cc} = 4,53 \text{ A}$. Dessa forma, $R_{eq} = 1,243 \Omega$ e $X_{eq} = 0,458 \Omega$.

Para obtenção das resistências e reatâncias de dispersão de cada enrolamento pode-se considerar como primeira aproximação que os valores totais se dividem igualmente entre os mesmos. Assim, como a relação de transformação utilizada é 1:1 e os valores referidos são iguais aos reais, chega-se aos seguintes resultados:

$$R_1 = R_2 = 0,5R_{eq} = 0,62 \Omega \quad (3.1)$$

$$X_{d1} = X_{d2} = 0,5X_{eq} = 0,229 \Omega \quad (3.2)$$

É importante salientar que essa consideração de divisão igualitária entre os enrolamentos é mais útil para a reatância de dispersão que não apresenta um método eficaz de obtenção de forma direta. Com relação às resistências dos enrolamentos, o erro nessa simplificação pode ser corrigido se houver acesso aos terminais dos enrolamentos, possibilitando a medição direta com um ohmímetro.

3.4 Ensaio a Vazio

Novamente, foi usado um esquema de ligações semelhante ao da Figura 2.10, com o osciloscópio substituindo os demais instrumentos, e a alimentação do primário foi feita com 220 V retirados diretamente da rede. As medições e os valores calculados através das Equações (2.27), (2.28) e (2.29) são mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Ensaio a Vazio

V_{ca} [V_{rms}]	I_{ca} [mA_{rms}]	P_{ca} [W]	Q [VAR]	$f.p.$	$ Z_{\phi} $ [$k\Omega$]	R_c [$k\Omega$]	X_m [$k\Omega$]
89	34,3	2,25	2,01	0,737	2,595	3,520	3,839
105	38,6	2,66	2,32	0,656	2,720	4,145	3,605
116	44,0	3,63	3,51	0,711	2,636	3,707	3,750
129	49,6	4,32	4,32	0,675	2,601	3,852	3,526
138	54,2	4,81	5,28	0,643	2,546	3,959	3,325
150	61,4	5,86	6,90	0,636	2,443	3,840	3,167
160	67,1	6,50	8,09	0,605	2,384	3,938	2,996
173	77,4	7,61	10,50	0,568	2,235	3,933	2,716
181	83,9	8,22	12,10	0,541	2,157	3,986	2,566
194	96,8	9,47	15,60	0,504	2,004	3,974	2,321
203	108,0	10,50	18,90	0,479	1,880	3,925	2,141
210	113,0	10,90	20,30	0,459	1,858	4,046	2,092
218	131,0	12,00	24,80	0,420	1,664	3,960	1,834
229	172,0	12,70	31,70	0,322	1,331	4,129	1,406
238	206,0	14,30	42,40	0,292	1,155	3,961	1,208
251	259,0	16,40	65,20	0,252	0,969	3,841	1,001

A partir dos dados da Tabela 3.3, é possível traçar a curva de magnetização do núcleo do transformador em questão, mostrada na Figura 3.4. A curva de magnetização foi obtida através da interpolação de um polinômio de ordem 5 aplicado aos dados obtidos durante o ensaio. É clara a presença do magnetismo

residual no núcleo do transformador, pois para uma pequena corrente existe considerável tensão induzida no enrolamento primário.

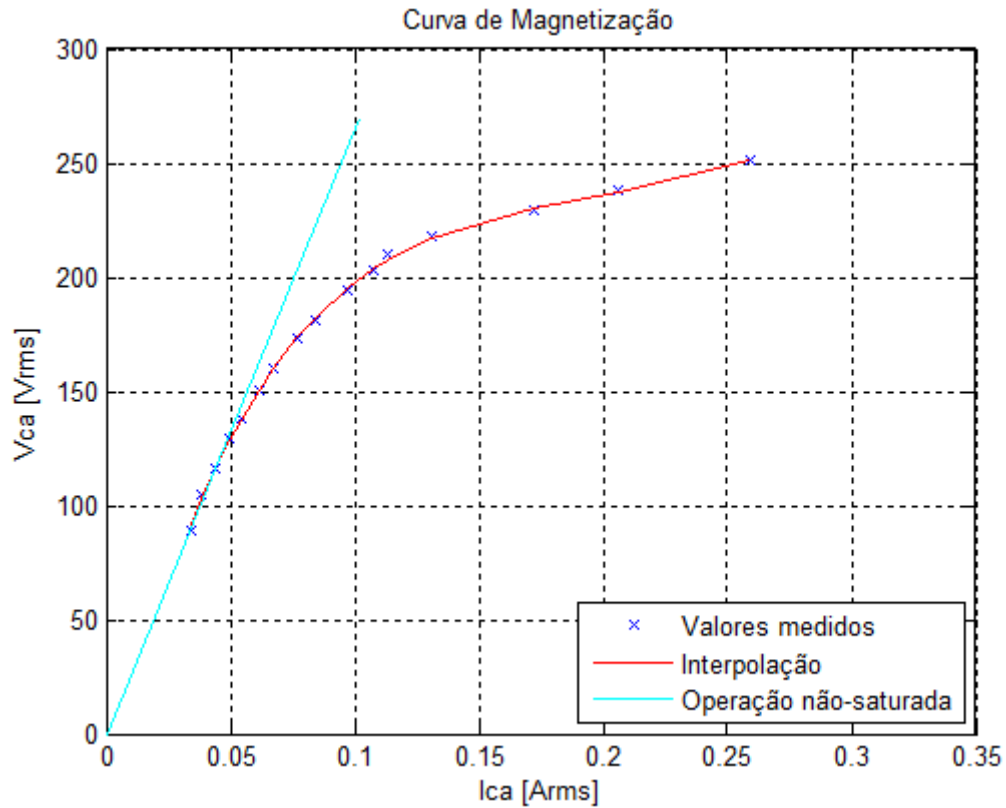


Figura 3.4 - Curva de Saturação obtida no Ensaio a Vazio

A reta tangente na Figura 3.4 representa a característica de energização do núcleo se não ocorresse saturação do material ferromagnético e evidencia que, na região de saturação, um pequeno incremento na tensão é acompanhado de uma enorme variação na corrente, assim como era esperado. Esta reta também pode ser usada para calcular a impedância do núcleo em qualquer ponto da curva de magnetização do transformador. A partir dela, considerando-se constante a resistência das perdas no núcleo, é possível calcular o respectivo valor para a reatância de magnetização do núcleo por meio da Equação (2.30). Isso permite que a característica da reatância de magnetização, claramente não-linear, possa ser representada com precisão satisfatória no circuito equivalente do equipamento por uma indutância constante, contanto que este valor seja ajustado de acordo com a variação da tensão de alimentação.

Assim, a resistência do ramo *shunt* do circuito equivalente será aquela obtida no ensaio para a tensão mais próxima (218 V) à nominal, ou seja, $R_c = 3,96 \text{ k}\Omega$. Já

a reatância de magnetização será considerada variável, sendo seu valor igual ao encontrado no ensaio a vazio para a tensão de alimentação mais próxima aquela que será analisada com o circuito equivalente.

O baixo fator de potência apresentado pelas medições do ensaio a vazio reflete a relevância da parcela indutiva da impedância de magnetização que, apesar de diminuir com o aumento da tensão de alimentação, apresenta valores comparáveis com a resistência do núcleo.

O circuito equivalente obtido através dos ensaios anteriores e que será utilizado posteriormente para analisar o desempenho do transformador monofásico está representado na Figura 3.5. É importante lembrar que, com exceção da reatância de magnetização X_m , todos os demais parâmetros serão considerados constantes para quaisquer condições de funcionamento do transformador.

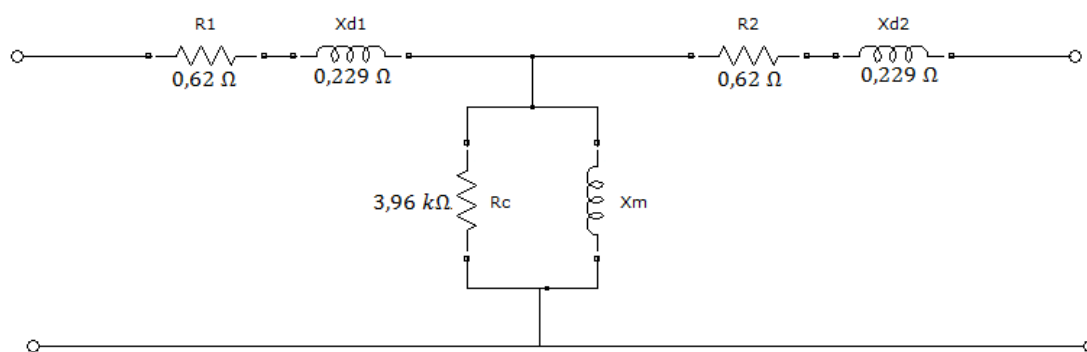


Figura 3.5 – Circuito Equivalente obtido

Como a impedância *shunt* do núcleo apresenta valores muito superiores às impedâncias série dos enrolamentos, constatação feita na Seção 2.6 e que foi comprovada nos ensaios de curto e a vazio, admite-se que a pequena corrente que circula no enrolamento primário durante o ensaio a vazio é a corrente de excitação do transformador, sendo esta a soma da parcela de perdas no núcleo com a parcela de magnetização responsável por criar o fluxo mútuo.

A seguir serão expostas as correntes de excitação para diferentes níveis de alimentação. Para evitar a repetição serão exibidas apenas algumas formas de onda, juntamente com suas respectivas componentes harmônicas calculadas pela aplicação de FFT do osciloscópio, e os demais resultados serão incluídos na Tabela 3.4.

A Figura 3.6 mostra a forma de onda da corrente de excitação referente à alimentação de 100 V e a Figura 3.7 apresenta a respectiva composição harmônica.

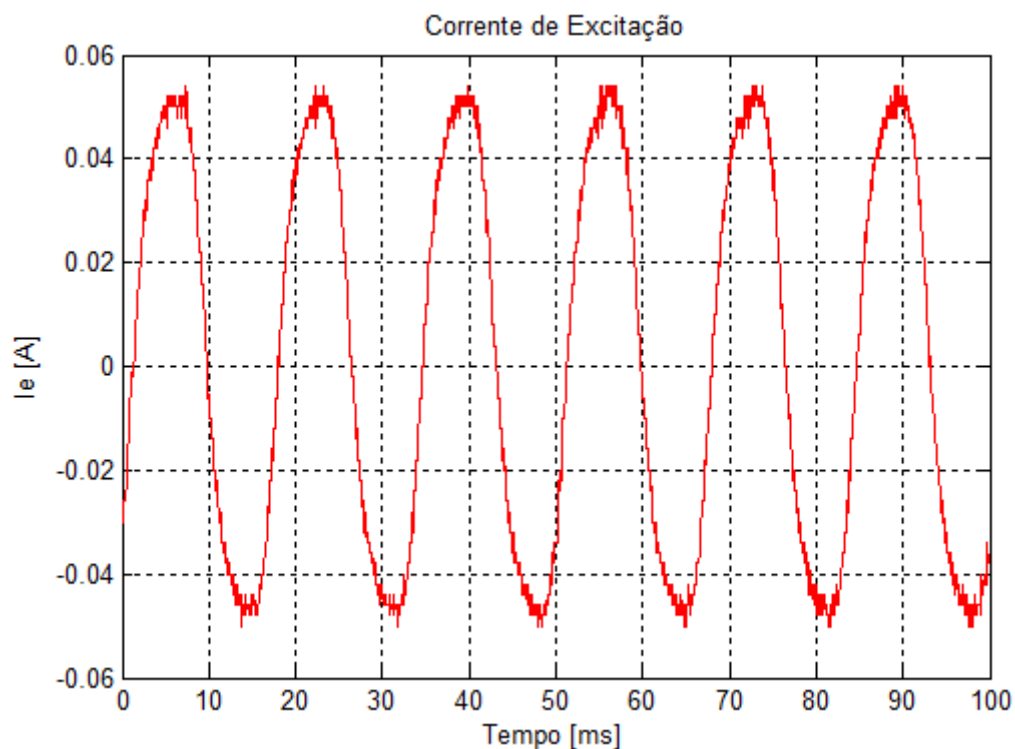


Figura 3.6 - Corrente de Excitação para alimentação de 100 V

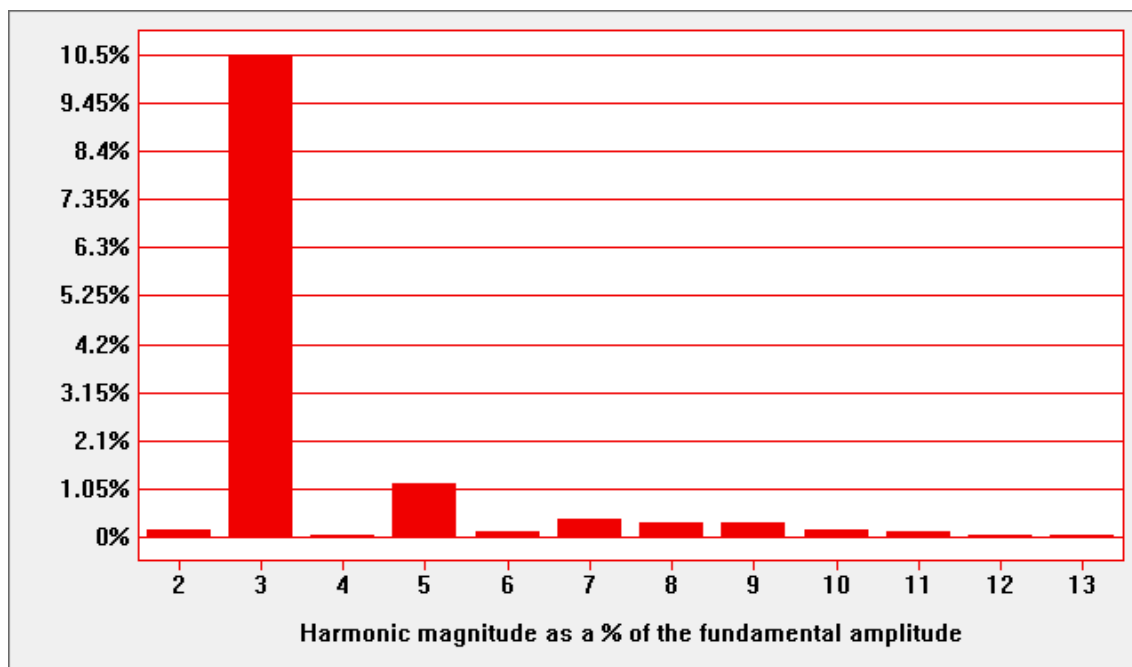


Figura 3.7 – Composição Harmônica da Corrente de Excitação para alimentação de 100 V

A Figura 3.8 mostra a forma de onda da corrente de excitação referente à alimentação de 160 V e a Figura 3.9 apresenta a respectiva composição harmônica.

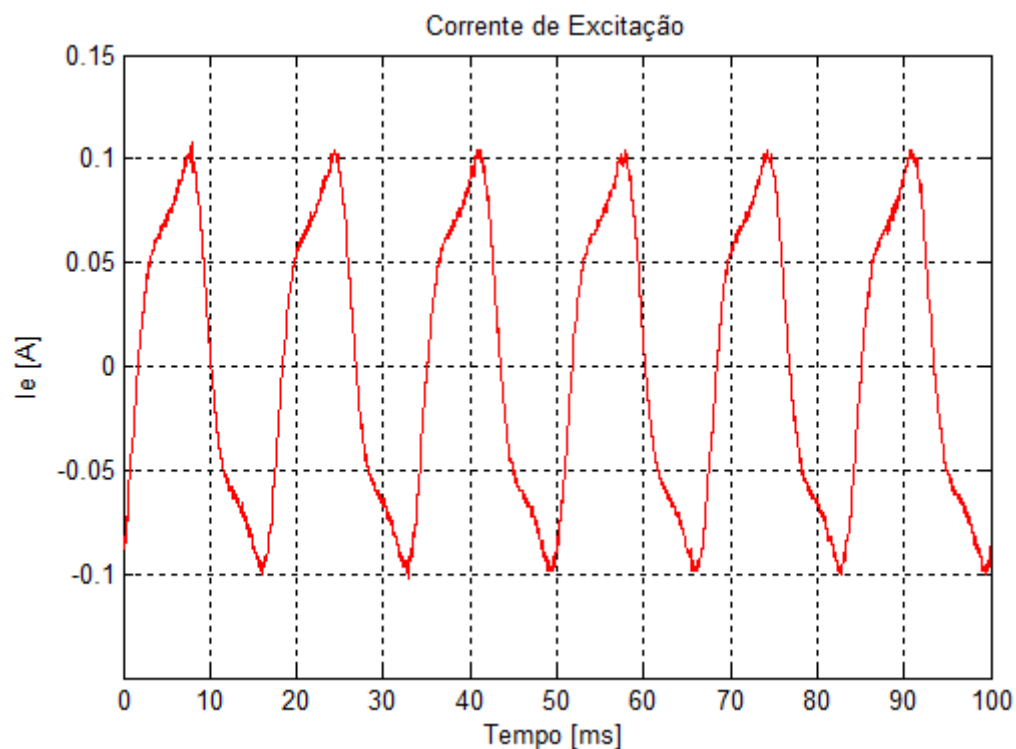


Figura 3.8 - Corrente de Excitação para alimentação de 160 V

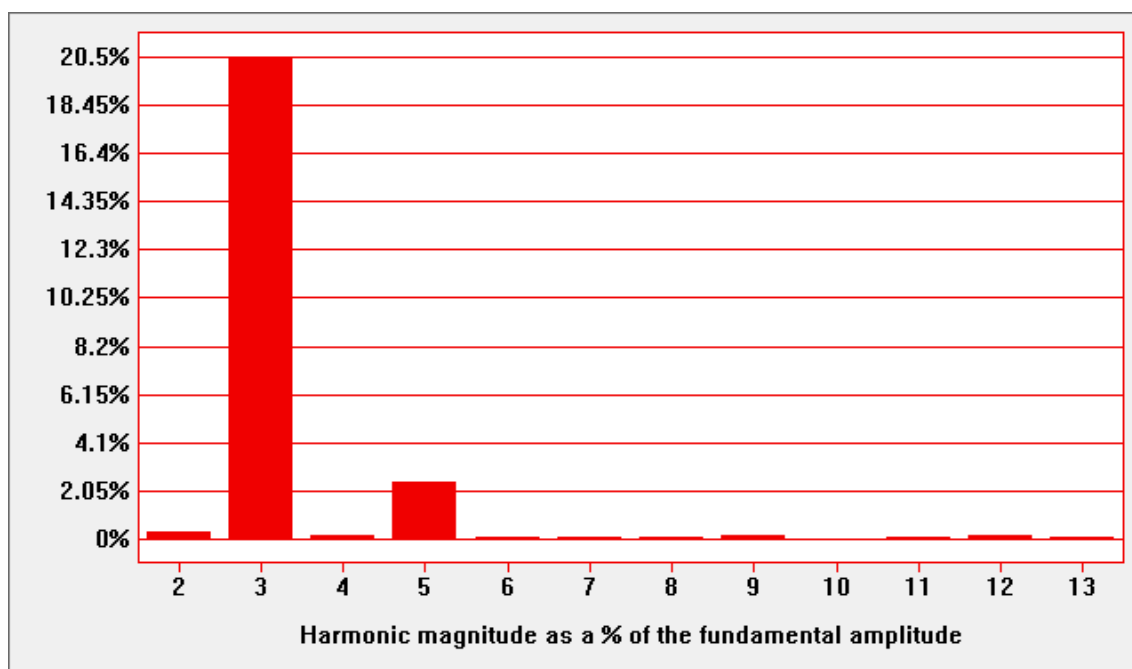


Figura 3.9 - Composição Harmônica da Corrente de Excitação para alimentação de 160 V

A Figura 3.10 mostra a forma de onda da corrente de excitação referente à alimentação de 200 V e a Figura 3.11 apresenta a respectiva composição harmônica.

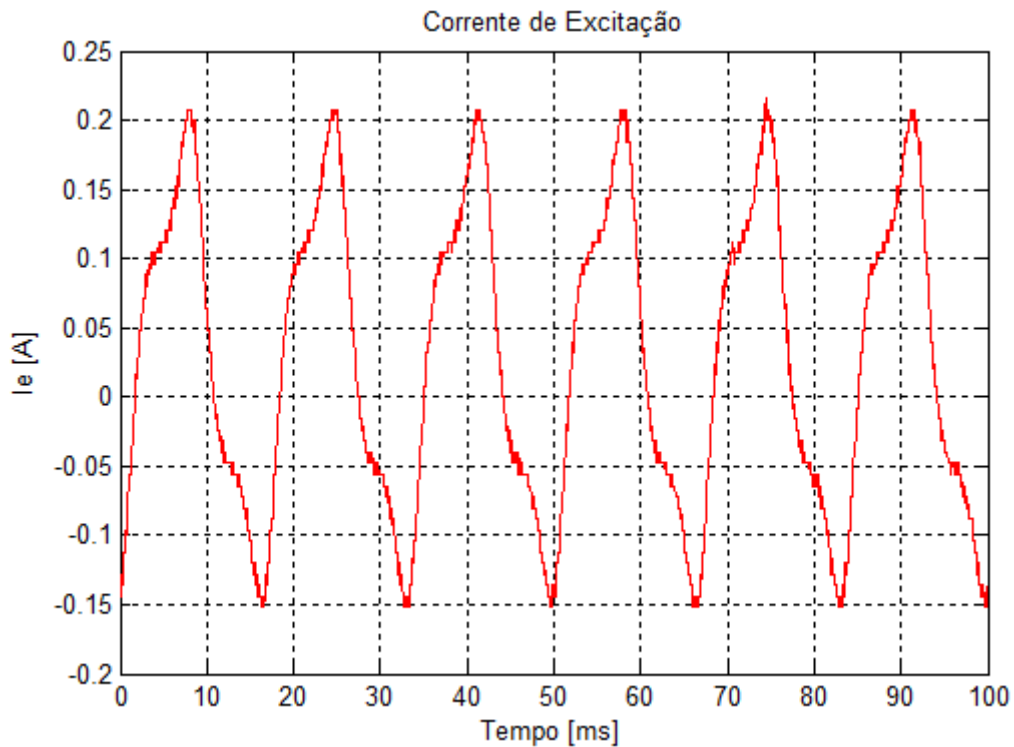


Figura 3.10 - Corrente de Excitação para alimentação de 200 V

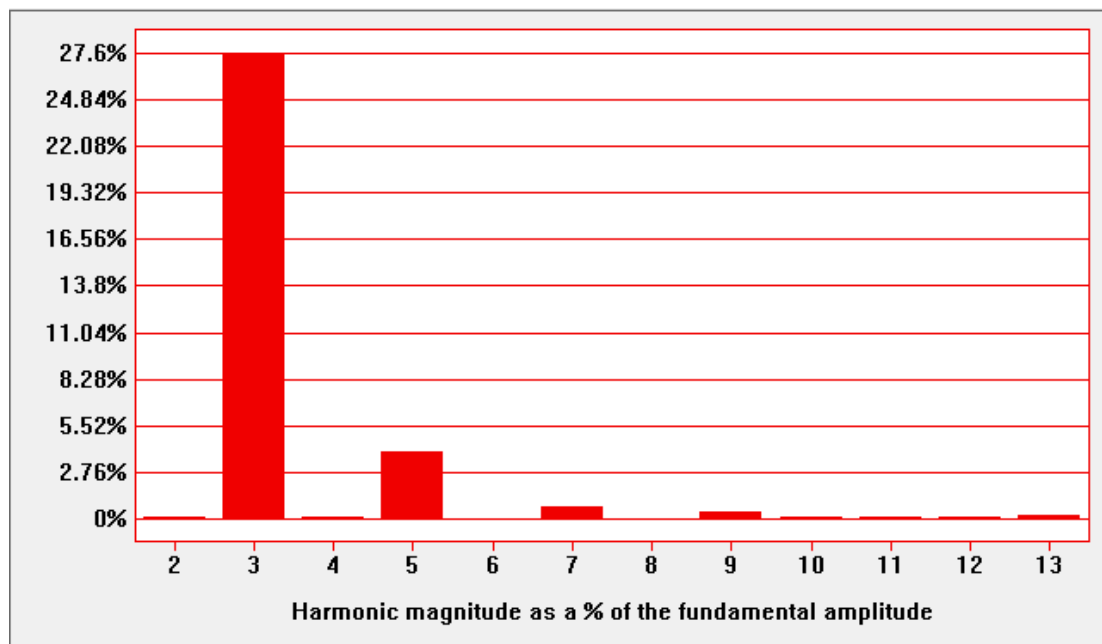


Figura 3.11 - Composição Harmônica da Corrente de Excitação para alimentação de 200 V

A Figura 3.12 mostra a forma de onda da corrente de excitação referente à alimentação de 220 V e a Figura 3.13 apresenta a respectiva composição harmônica.

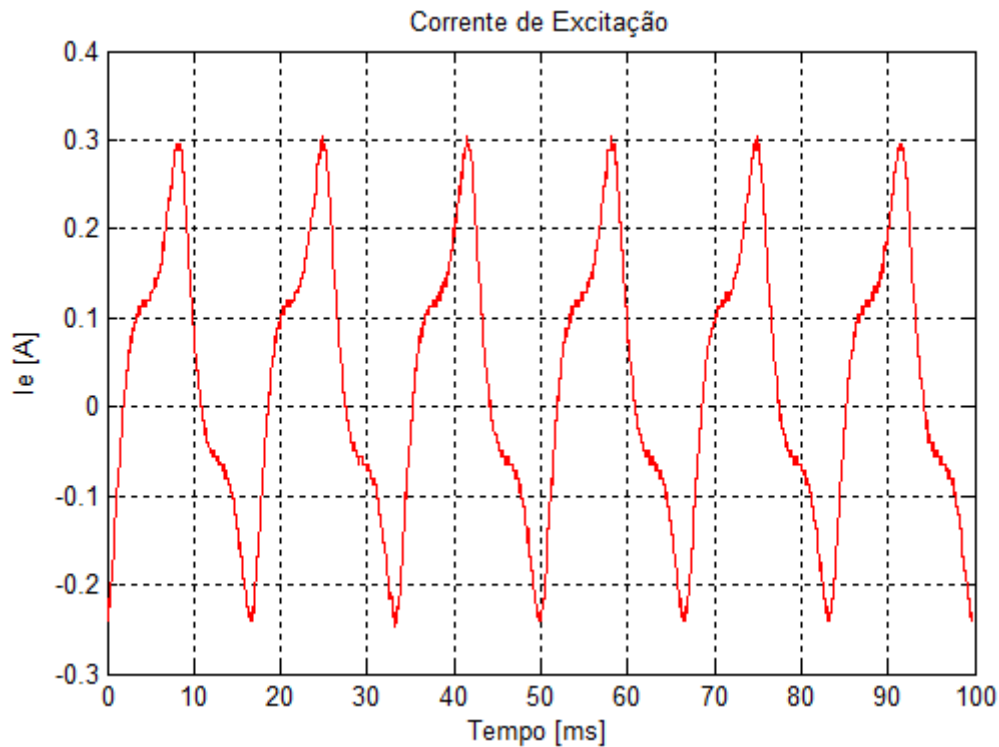


Figura 3.12 - Corrente de Excitação para alimentação de 220 V

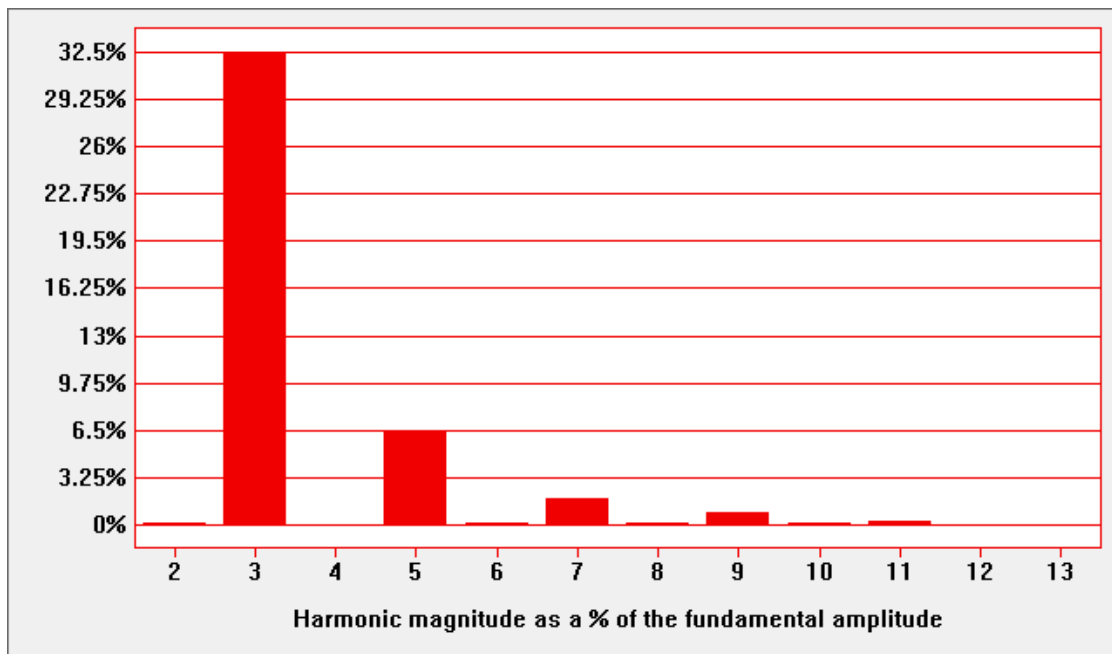


Figura 3.13 - Composição Harmônica da Corrente de Excitação para alimentação de 220 V

A Figura 3.14 mostra a forma de onda da corrente de excitação referente à alimentação de 260 V e a Figura 3.15 apresenta a respectiva composição harmônica.

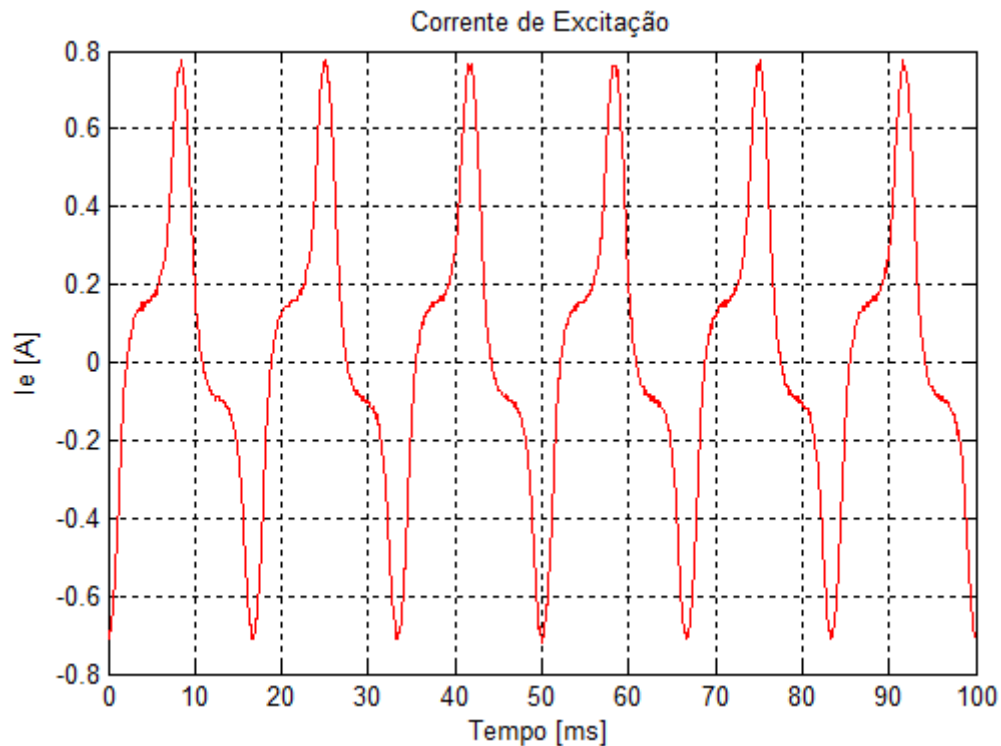


Figura 3.14 - Corrente de Excitação para alimentação de 260 V

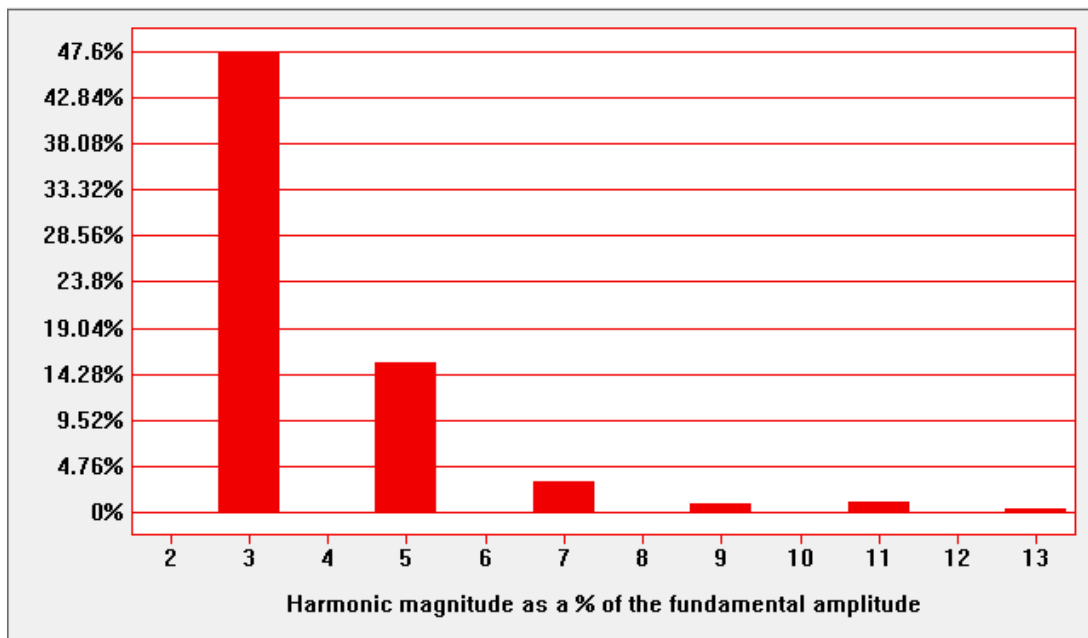


Figura 3.15 - Composição Harmônica da Corrente de Excitação para alimentação de 260 V

A partir da Tabela 3.4 e das figuras anteriores, é possível comprovar que a corrente de excitação apresenta baixa amplitude e uma acentuada distorção em relação à tensão senoidal de 60 Hz aplicada, sendo que os primeiros harmônicos ímpares, principalmente o 3º, possuem maior influência. O THD (*Total Harmonic Distortion*) é um parâmetro que indica a relação entre a amplitude média de todas as harmônicas e a amplitude da fundamental. Assim, quanto maior for o THD, mais distorcido será o sinal analisado.

Este resultado condiz com o que foi exposto na Seção 2.5, atestando que quanto maior é a tensão e o fluxo mútuo, maior será a saturação do material ferromagnético no núcleo do transformador.

Tabela 3.4 - Medições da Corrente de Excitação

Tensão Aplicada [V]	Corrente de Excitação [mA]	Amplitude da Fundamental [mA]	Amplitude do Harmônico [% em relação à fundamental]			THD [%]
			3º	5º	7º	
100	37,85	37,60	10,45	1,90	0,42	10,54
123	47,21	46,73	13,97	1,52	0,07	14,09
145	58,85	57,97	17,90	2,06	0,22	18,02
160	68,25	66,91	20,49	2,47	0,08	20,65
182	85,71	83,06	23,73	2,80	0,14	23,90
200	111,77	104,05	27,52	3,97	0,72	27,82
212	128,09	119,00	29,71	4,85	1,00	30,13
220	145,50	135,30	32,49	6,55	1,84	33,21
230	166,58	153,95	35,23	8,41	2,65	36,34
240	209,32	191,37	40,01	11,91	4,26	41,99
250	270,88	243,48	44,78	15,09	4,94	47,52
260	356,01	217,50	47,54	15,50	3,16	50,12

3.5 Medição do laço de histerese

O procedimento utilizado para permitir a visualização da curva de histerese do transformador foi apresentado em [5] e será brevemente discutido a seguir.

Como a força magnética (H) e a densidade de fluxo magnético (B) não podem ser medidas diretamente através de um osciloscópio é preciso fazer manipulações algébricas para obter a relação entre essas grandezas proporcionalmente a tensões e correntes que possam ser facilmente medidas.

A Equação (3.3) abaixo representa a Lei de Ampère, mostrando como a força magnética no núcleo se relaciona com a corrente total que atravessa o caminho fechado C:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I \quad (3.3)$$

O somatório total das correntes é dado pelo produto das espiras pela corrente que atravessa cada um dos enrolamentos e, como o comprimento l do circuito magnético formado pelo núcleo é constante, o valor médio do campo magnético resultante pode ser calculado por:

$$Hl = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (3.4)$$

Se a corrente no secundário do transformador for considerada nula, o que é verdade no caso de funcionamento a vazio, representando uma boa aproximação para o circuito que será usado na medição, chega-se à relação entre a corrente no primário e o campo magnético no núcleo:

$$H = \frac{N_1}{l} i_1 \quad (3.5)$$

No caso da densidade de fluxo, a análise será feita no secundário do transformador. A tensão induzida nos terminais do enrolamento secundário obedece à Lei de Faraday e é calculada pela Equação (2.6), escrita novamente na Equação (3.6).

$$e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.6)$$

O fluxo variável é o resultado da multiplicação da densidade momentânea de fluxo em dada superfície pela área desta superfície, ou seja:

$$\varphi = \int \vec{B} d\vec{A} \quad (3.7)$$

Como, no caso do transformador, a área da seção reta do núcleo é constante, a Equação (3.6) pode ser simplificada como:

$$e_2 = N_2 A \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (3.8)$$

Resolvendo-se a equação anterior para \vec{B} chega-se ao seguinte resultado:

$$\vec{B} = \frac{1}{N_2 A} \int e_2 dt \quad (3.9)$$

Para obtenção da integral da tensão induzida no secundário é conectado um circuito integrador RC nos terminais do enrolamento como mostrado na Figura 3.16.

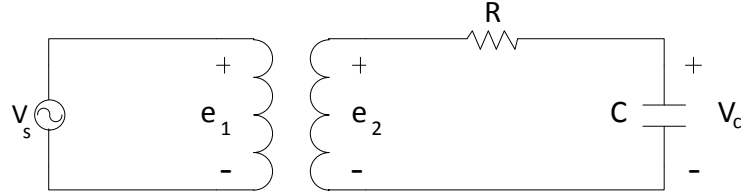


Figura 3.16 – Circuito integrador RC

Se for aplicada a Lei de Kirchhoff das Tensões no circuito formado pelo secundário e pelo integrador da figura acima, chega-se ao seguinte resultado para a corrente i_2 :

$$i_2 = \frac{e_2}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (3.10)$$

Como o circuito integrador é um filtro passa-baixa, se a frequência do sinal aplicado, neste caso 60 Hz, for muito maior que a frequência de corte do filtro ($\omega \gg \frac{1}{RC}$), o capacitor não conseguirá se carregar com o valor de pico do sinal alternado. Dessa forma, a rejeição da alta frequência faz com que a queda de tensão sobre o capacitor seja desprezível se comparada com a queda no resistor, fazendo com que a Equação (3.10) possa ser simplificada como:

$$i_2 = \frac{e_2}{R} \quad (3.11)$$

Assim, a tensão armazenada no capacitor será:

$$V_c = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{RC} \int e_2 dt \quad (3.12)$$

A montagem do integrador no secundário do transformador está mostrada na Figura 3.17, e os valores totais são $R = 178 \text{ k}\Omega$ e $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$.

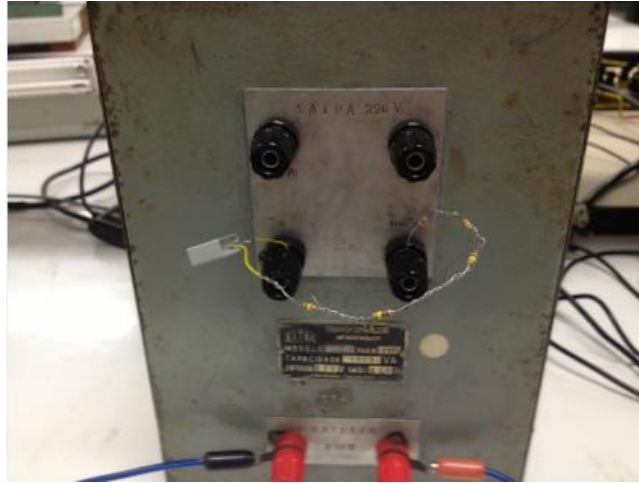


Figura 3.17 - Conexão do circuito RC no secundário

A Equação (3.12) pode ser substituída na Equação (3.9), fornecendo a relação desejada entre a densidade de fluxo e a tensão sobre o capacitor que pode ser facilmente medida com o osciloscópio:

$$B = \frac{RC}{N_2 A} V_c \quad (3.13)$$

As Equações (3.5) e (3.13) mostram como se pode representar a curva de histerese a partir da medição da corrente no enrolamento primário e da tensão sobre o capacitor do filtro passivo. Apesar de não ter sido possível obter o número preciso de espiras em cada enrolamento, o fato da relação de transformação considerada nos ensaios ser 1:1 permite que o número de espiras dos dois enrolamentos seja considerado igual. Assim, substituindo N_1 e N_2 por N nas Equações (3.5) e (3.13) chega-se às equações (3.14) e (3.15), que mostram os fatores de escala para os eixos da curva $B \times H$ considerando os valores de capacitância e resistência utilizados na construção do circuito RC e as dimensões do núcleo medidas.

$$H = 1,96 N i_1 \quad (3.14)$$

$$B = 54,27 \frac{V_c}{N} \quad (3.15)$$

As figuras a seguir mostram as curvas de histerese obtidas, para diversos valores de tensão de alimentação, utilizando a plotagem simultânea das medições de corrente primária e da tensão no capacitor.

É importante ressaltar que a curva de histerese representa as perdas por unidade de volume do material a cada ciclo da tensão aplicada. Assim, para chegar-se ao valor exato da energia dissipada por aquecimento no processo de orientação dos domínios magnéticos e pelas correntes parasitas do núcleo do transformador, a área de cada laço deve ser multiplicada pela frequência do sinal da fonte (60 Hz) e pelo volume total que o material ferromagnético ocupa, ou seja, $Vol = 32,8 \text{ cm}^2 \times 51 \text{ cm} = 0,001673 \text{ m}^3$.

A Figura 3.18 apresenta o laço de histerese obtido com a tensão de 101 V.

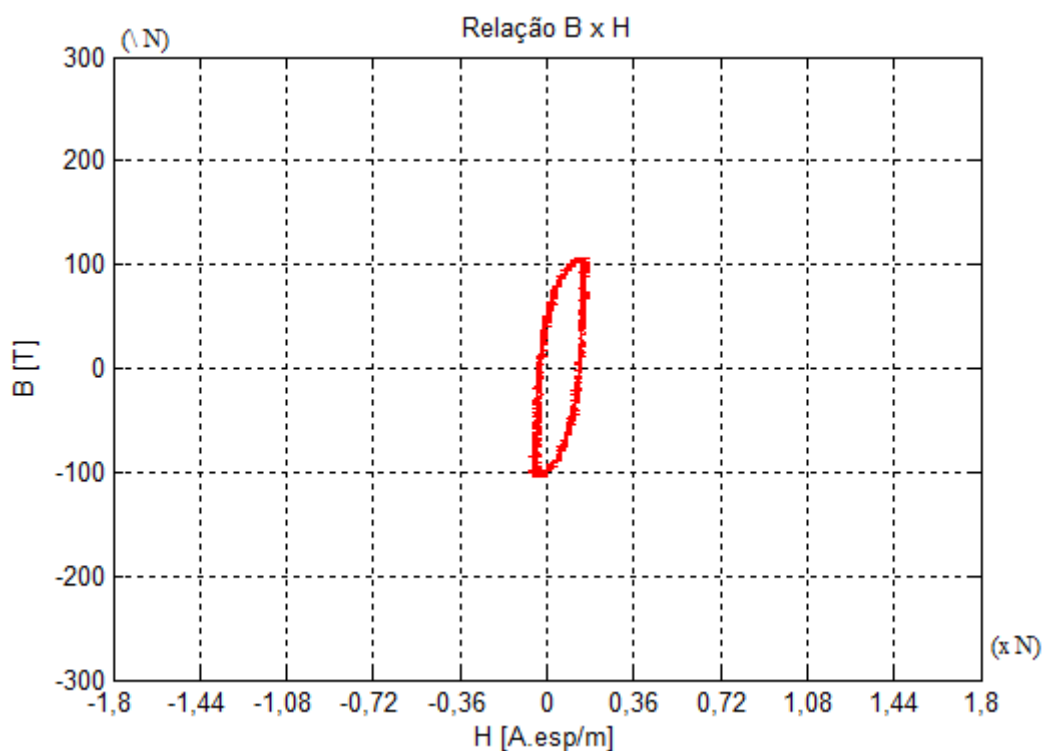


Figura 3.18 - Curva de Histerese para alimentação de 101 V

A Figura 3.19 apresenta o laço de histerese obtido com a tensão de 160 V.

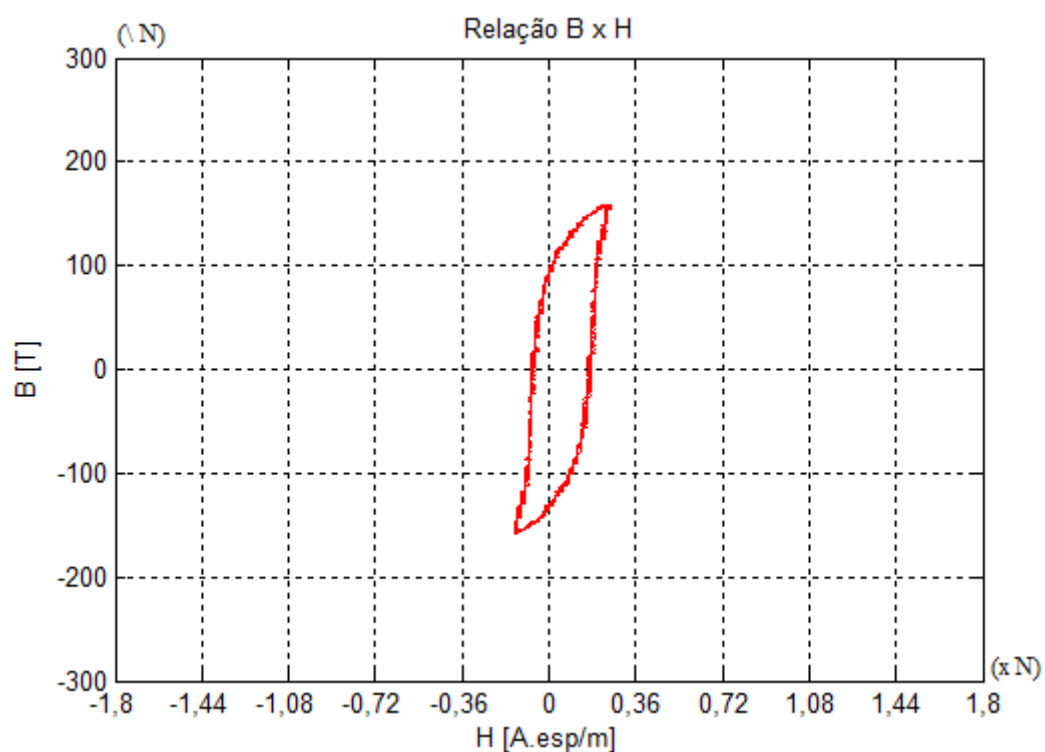


Figura 3.19 - Curva de Histerese para alimentação de 160 V

A Figura 3.20 apresenta o laço de histerese obtido para tensão de 200 V.

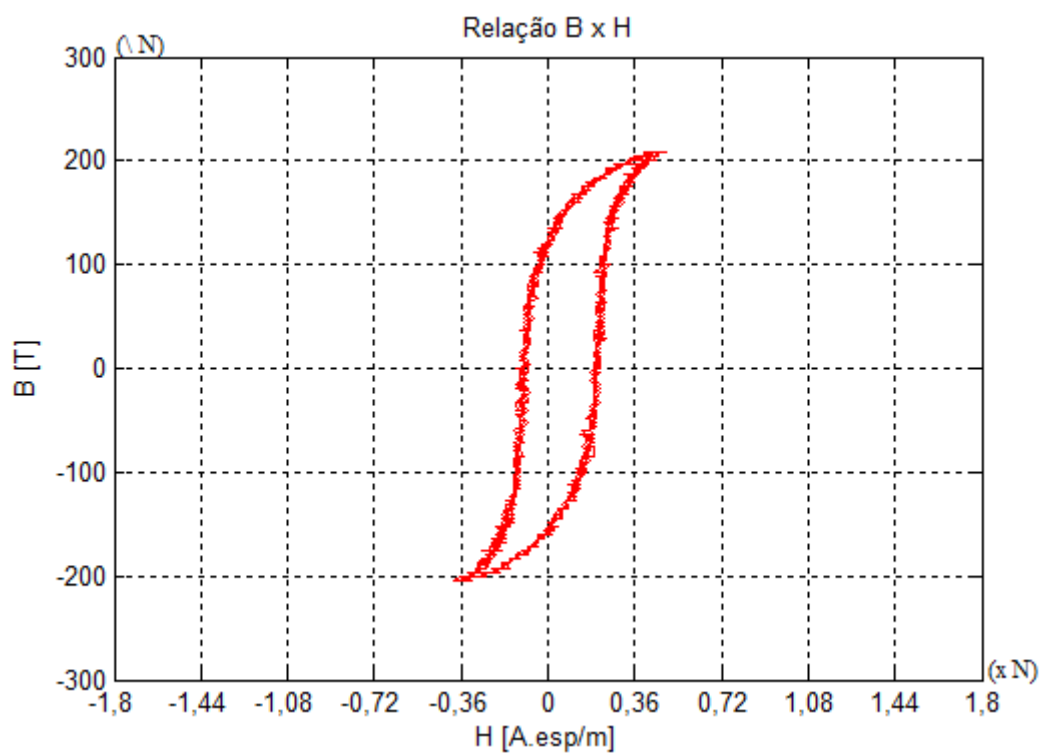


Figura 3.20 - Curva de Histerese para alimentação de 200 V

A Figura 3.21 apresenta o laço de histerese obtido para tensão de 220 V.

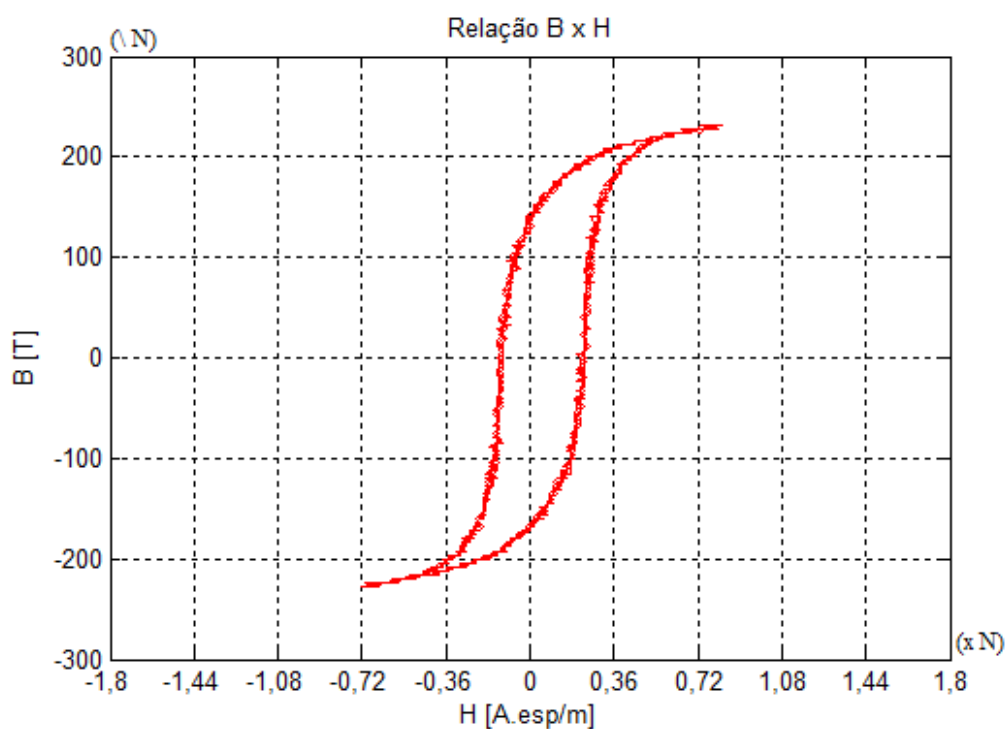


Figura 3.21 - Curva de Histerese para alimentação de 220 V

A Figura 3.22 apresenta o laço de histerese obtido para tensão de 250 V.

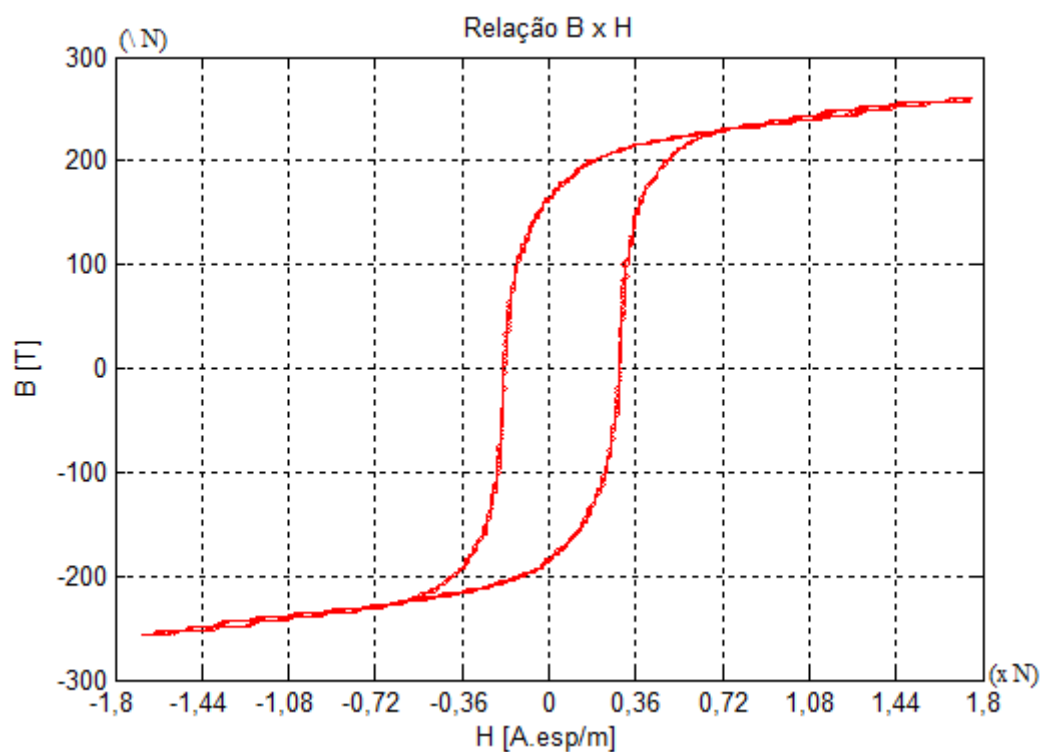


Figura 3.22 - Curva de Histerese para alimentação de 250 V

A Tabela 3.5 a seguir apresenta os resultados obtidos para as perdas no núcleo através do cálculo da área dos laços de histerese mostrados anteriormente. Vale ressaltar que as perdas por correntes parasitas serão consideradas como componentes dos laços de histerese e, por isso, as perdas encontradas na tabela a seguir podem ser entendidas como o total das perdas que ocorrem no núcleo do transformador.

Tabela 3.5 – Perdas no núcleo encontradas a partir das medições do laço de histerese

Tensão [V]	Área do Laço $\left[\frac{Wb.A}{m^3}\right]$	P_c [W]
50	7,3	0,733
75	16,2	1,626
101	29,1	2,921
120	35,9	3,604
141	46,4	4,658
160	61,7	6,193
181	77,4	7,769
200	98,0	9,837
211	115,3	11,574
220	126,0	12,648
230	136,8	13,732
240	153,5	15,408
250	169,3	16,994

A partir desta sequência de curvas e da tabela acima é possível perceber que as perdas são diretamente proporcionais à tensão e, conseqüentemente, ao fluxo mútuo que atravessa o núcleo. Mesmo nas primeiras curvas, que não apresentam o formato típico do laço de histerese, já se nota a relação não linear entre o fluxo e a

corrente de excitação do transformador e essa distorção se torna clara na última curva que representa uma condição de operação extremamente saturada.

Todas essas análises condizem com o que foi apresentado na Seção 2.3 e atestam a eficácia da utilização do circuito integrador para adquirir a curva de histerese através da exibição simultânea dos dois canais do osciloscópio.

3.6 Medições de Potência para Diferentes Condições de Carga

Nesta seção serão mostrados os resultados de medição de potência instantânea feita através da aplicação do osciloscópio que multiplica os valores dos dois canais e exibe a forma de onda resultante na tela. Assim, o canal 1 foi usado para medir corrente e o canal 2 para a obtenção do sinal de tensão correspondente na tentativa de estabelecer a variação das perdas no transformador para diferentes condições de alimentação e carga.

Antes de se discutir a dinâmica dos mecanismos de perdas no transformador é preciso esclarecer que os valores de resistência usados nos cálculos são os valores para corrente contínua (R_{cc}). Esses valores tendem a ser inferiores aos de resistência dos condutores para passagem de corrente alternada (R_{ca}) em virtude do efeito pelicular que, proporcionalmente à frequência, modifica a densidade de corrente no interior do condutor e confina os elétrons à camada superficial do mesmo [9].

Para avaliar a influência do efeito pelicular foi medida a resistência R_{cc} dos enrolamentos, com o transformador desligado, através do multímetro e chegou-se ao valor de $R_1 = 0,6 \, \Omega$ para o primário e $R_2 = 0,8 \, \Omega$ para o secundário. A diferença entre as resistências dos dois enrolamentos pode ser explicada pela existência de conexões adicionais para fabricação dos tapes (soldas e terminais).

Se for feita a comparação do menor valor com a resistência R_{ca} obtida por meio do ensaio de curto-circuito, que vale $0,62 \, \Omega$, pode-se perceber que a influência do efeito pelicular existe, mas é praticamente desprezível para a

frequência de 60 Hz dos sinais com os quais o transformador opera. Isso já era esperado, pois, como foi dito, este efeito tem relação direta com a frequência e não apresenta impactos significativos em circuitos que trabalhem com baixas frequências. Dessa forma, os valores de resistência medidos com o multímetro serão considerados constantes para todos os ensaios que serão feitos na sequência.

3.6.1 Sem Carga

Nesta configuração sem carga conectada ao secundário, serão realizadas medições de corrente e tensão apenas no enrolamento energizado.

Para o cálculo das perdas de diferentes naturezas a partir das medições realizadas com o osciloscópio serão utilizados os parâmetros do circuito equivalente do transformador calculados anteriormente.

É importante ressaltar que, apesar da corrente e tensão, em um grau muito menor, medidas apresentarem distorção harmônica na operação a vazio, será considerada apenas a potência dissipada pelas componentes fundamentais para facilitar os cálculos, visto que a inclusão das perdas harmônicas representaria uma pequena diferença no resultado final.

Por praticidade, será feita a dedução detalhada apenas para a tensão de alimentação nominal, sendo que os demais resultados, calculados de forma análoga, serão expostos na Tabela 3.6.

Os seguintes dados são fornecidos pelo osciloscópio:

- Potência Aparente: $S_1 = 30,443 \text{ VA}$;
- Potência Ativa: $P_1 = 12,537 \text{ W}$;
- Potência Reativa: $Q_1 = 27,742 \text{ VAR}$;
- Tensão Fundamental: $v_1 = 220,03 \text{ V}$;
- Corrente Fundamental: $i_1 = 131,50 \text{ mA}$;

As perdas ôhmicas no cobre do enrolamento primário podem ser calculadas através do valor medido da corrente e do valor da resistência série do enrolamento primário, ou seja, $P_{\text{cobre}} = |i_1|^2 R_1$. Se esse valor for subtraído da potência ativa

total fornecida pela fonte, chega-se ao valor das perdas no ferro do núcleo por histerese e correntes parasitas, como mostra a Equação (3.16) abaixo:

$$P_c = P_1 - P_{R1} = 12,537 - 0,6(0,1315)^2 = 12,526 \text{ W} \quad (3.16)$$

O mesmo raciocínio pode ser utilizado para avaliar as perdas ocorridas pelo efeito de dispersão (Q_{d1}) no enrolamento primário que afetam a potência reativa presente no núcleo do transformador.

$$Q_m = Q_1 - |i_1|^2 X_{d1} = 27,742 - 0,229(0,1315)^2 = 27,738 \text{ VAr} \quad (3.17)$$

Essa parcela corresponde à potência utilizada para excitação do material ferromagnético e formação do fluxo mútuo que atravessa o núcleo. Como o transformador está operando sem carga, toda potência consumida da alimentação é dissipada sob a forma de perdas ou utilizada para magnetização do núcleo.

A tabela a seguir reúne as informações medidas e os cálculos realizados para diversas tensões aplicadas:

Tabela 3.6 – Cálculo das perdas para transformador sem carga

v_1 (Fundamental) [V]	i_1 (Fundamental) [mA]	S_1 [VA]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	P_{R1} [W]	P_c [W]	Q_{d1} [Var]	Q_m [Var]
49,135	21,316	1,053	0,766	0,722	0,000	0,766	0,000	0,722
100,58	38,245	3,896	2,864	2,642	0,001	2,863	0,000	2,642
120,88	45,758	5,597	3,975	3,940	0,001	3,974	0,000	3,940
140,30	55,326	7,909	5,274	5,893	0,002	5,272	0,000	5,893
160,26	66,822	10,941	6,740	8,618	0,003	6,737	0,001	8,617
179,36	81,530	15,024	8,356	12,486	0,004	8,352	0,001	12,485
202,26	103,72	21,775	10,520	19,066	0,007	10,513	0,002	19,064
210,76	114,69	25,171	11,435	22,423	0,008	11,427	0,003	22,420
220,03	131,50	30,443	12,537	27,742	0,011	12,526	0,004	27,738
230,85	155,06	38,182	13,938	35,547	0,015	13,923	0,005	35,542
239,80	184,95	48,057	15,162	45,602	0,021	15,141	0,008	45,594
249,22	230,40	63,398	16,771	61,140	0,033	16,738	0,012	61,128
259,91	295,08	85,757	18,750	83,682	0,087	18,663	0,020	83,662

Percebe-se que, na operação a vazio, as perdas por efeito Joule e por fluxo disperso nos enrolamentos são praticamente desprezíveis quando comparadas com as perdas no núcleo e a potência reativa do núcleo. Além disso, o aumento da tensão aplicada causa o aumento do fluxo produzido e da corrente de excitação, acarretando em aumento proporcional das perdas no equipamento. Apenas para ilustrar o que foi calculado na Tabela 3.6, abaixo serão mostradas algumas formas de onda da potência complexa medidas com o osciloscópio, nas Figuras 3.23, 3.24, 3.25, 3.26 e 3.27.

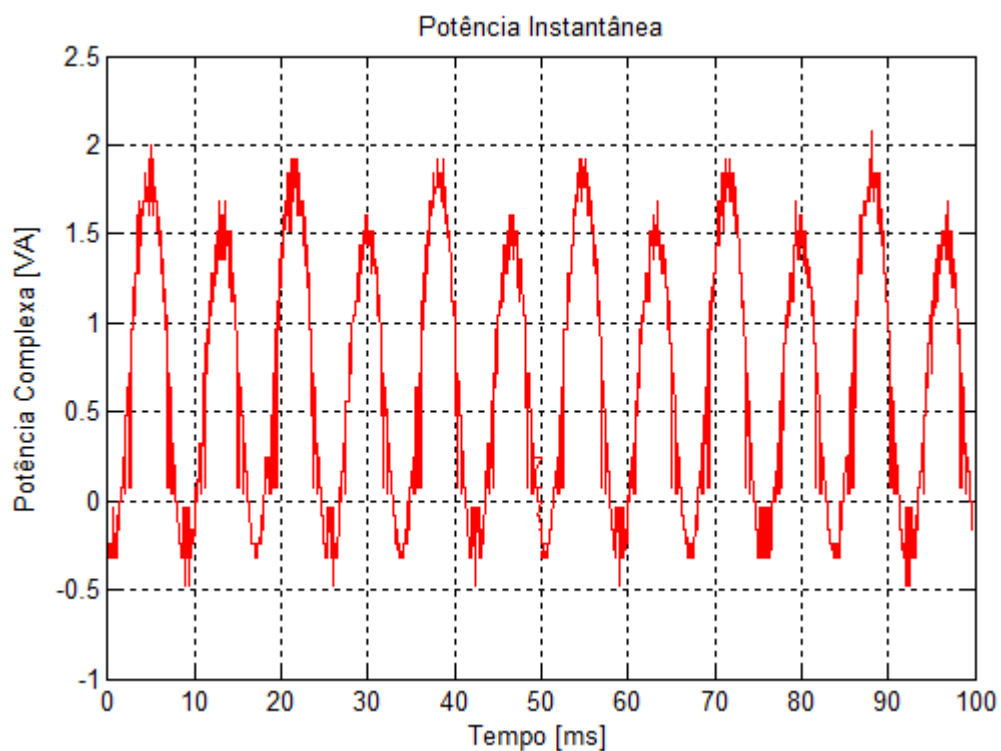


Figura 3.23 - Potência medida para tensão de 160,26 V e operação a vazio

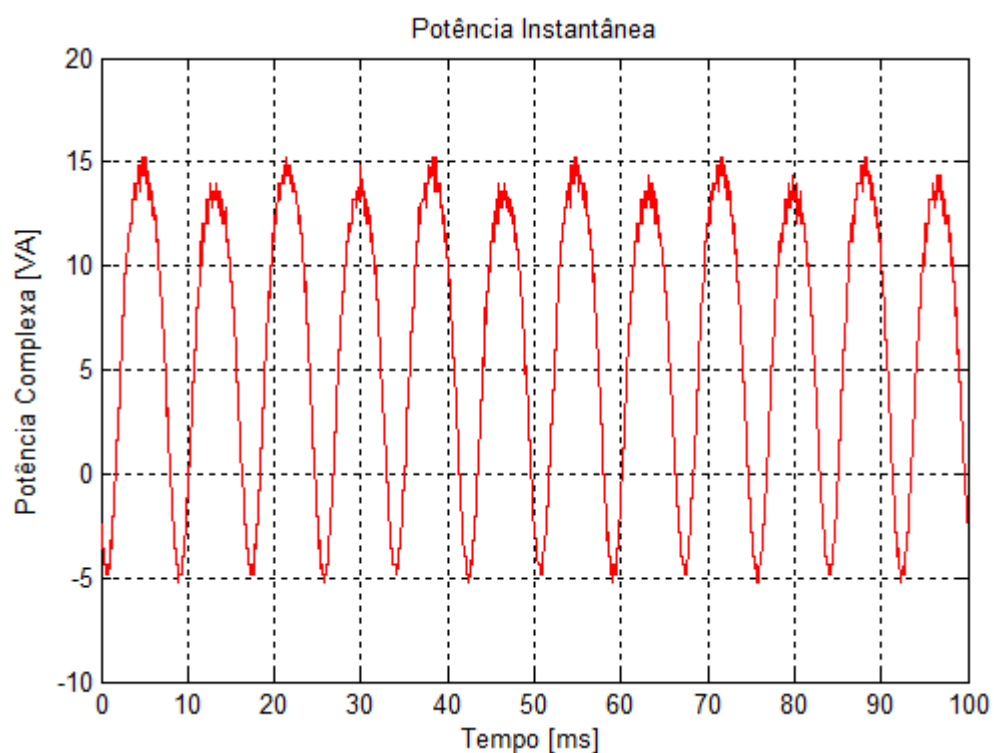


Figura 3.24 - Potência medida para tensão de 160,26 V e operação a vazio

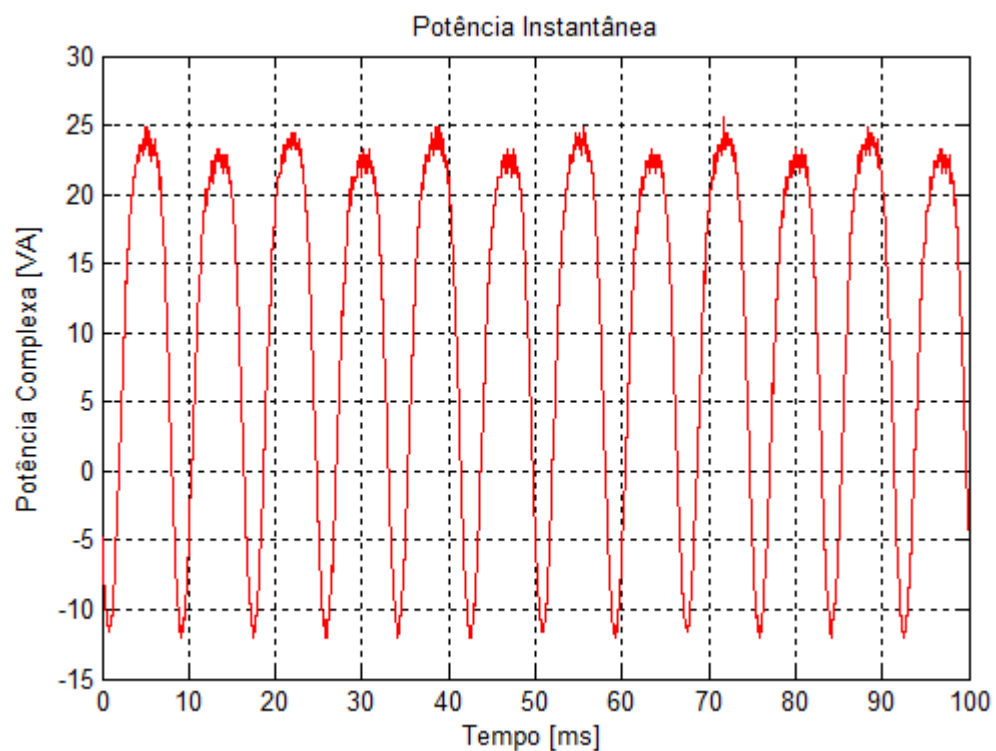


Figura 3.25 - Potência medida para tensão de 202,26 V e operação a vazio

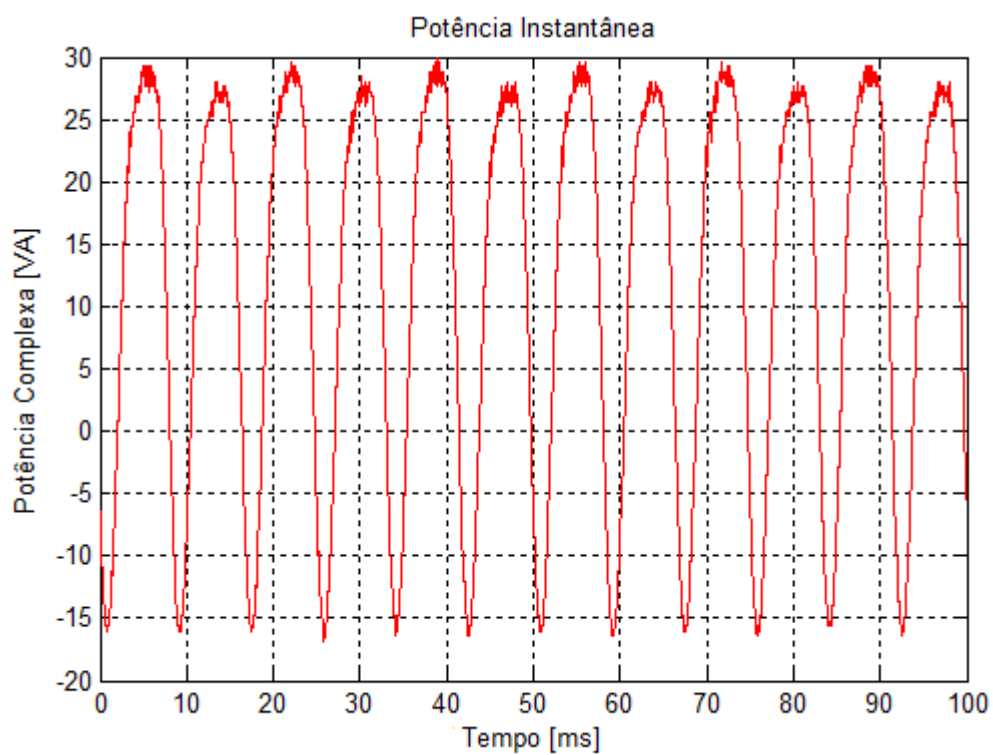


Figura 3.26 - Potência medida para tensão de 220,03 V e operação a vazio

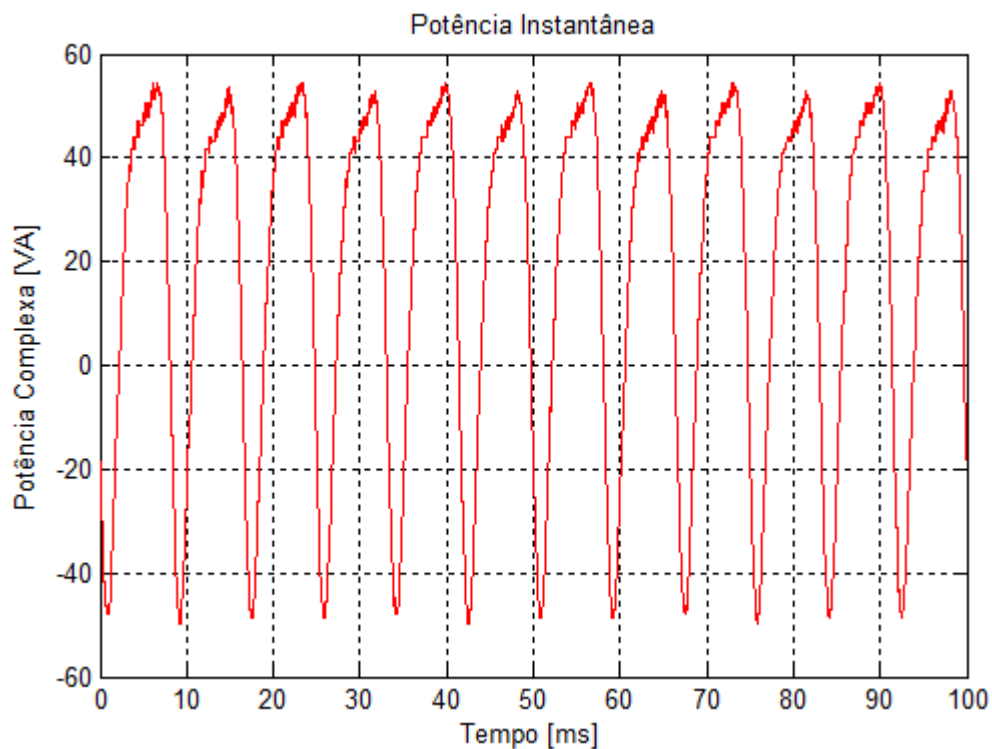


Figura 3.27 - Potência medida para tensão de 259,91 V e operação a vazio

3.6.2 Carga Resistiva

A carga utilizada é formada por 3 lâmpadas, de 220 V e 500 W cada, conectadas em paralelo nos terminais do enrolamento secundário do transformador e mostradas na Figura 3.28 abaixo. A resistência de cada lâmpada, medida com o multímetro antes da energização do circuito, é de $8,5 \, \Omega$ e, assim, a impedância equivalente da carga é de $2,83 \, \Omega$.

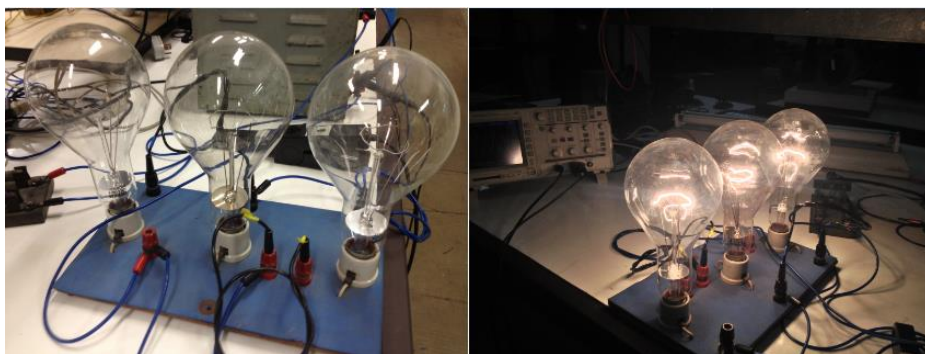


Figura 3.28 – Arranjo das lâmpadas usadas como carga resistiva

Seguindo o mesmo procedimento adotado para a operação sem carga, serão mostrados os cálculos apenas para uma tensão de alimentação, neste caso 100 V, e

os demais resultados, obtidos seguindo o mesmo método, serão exibidos nas Tabelas 3.7 e 3.8.

A grande diferença em relação ao desenvolvimento anterior é que, em virtude do transformador estar carregado, serão medidas tensão e corrente nos terminais do primário e do secundário e a aplicação de cálculo de potência utilizada em ambos os enrolamentos.

Novamente, a distorção harmônica, tanto de corrente quanto de tensão, será desprezada nos cálculos. Isso ocorre porque, como era esperado, a corrente que circula pelos enrolamentos com o transformador carregado é muito superior à corrente de magnetização.

As leituras do osciloscópio foram as seguintes:

- Potência Aparente no primário: $S_1 = 472,85 \text{ VA}$;
- Potência Ativa no primário: $P_1 = 472,85 \text{ W}$;
- Potência Reativa no primário: $Q_1 = 0 \text{ VAr}$;
- Tensão no primário: $v_1 = 100,35 \text{ V}$;
- Corrente no primário: $i_1 = 4,7122 \text{ A}$;
- Potência Aparente no secundário: $S_2 = 439,53 \text{ VA}$;
- Potência Ativa no secundário: $P_2 = 439,53 \text{ W}$;
- Potência Reativa no secundário: $Q_2 = 0 \text{ VAr}$;
- Tensão no secundário: $v_2 = 94,467 \text{ V}$;
- Corrente no secundário: $i_2 = 4,6528 \text{ A}$;

De posse dos dados acima é possível calcular a potência complexa de entrada fornecida pela fonte e a corrente fasorial que circula no enrolamento primário, como mostra a Equação (3.18). A tensão v_1 será considerada como referência e, por isso, terá sempre fase nula.

$$\dot{I}_1^* = \frac{S_1}{\dot{V}_1} = \frac{(P_1 + jQ_1)}{\dot{V}_1} = \frac{472,85}{100,35 \angle 0^\circ} = 4,712 \angle 0^\circ \therefore \dot{I}_1 = 4,712 \angle 0^\circ \text{ A} \quad (3.18)$$

Neste caso, não há parcela de potência reativa e, conseqüentemente, não existe defasagem entre corrente e tensão, fazendo com que o valor real da corrente seja igual ao seu conjugado. Porém, nos casos em que a corrente apresenta fase não-nula o uso de seu valor conjugado no cálculo da potência complexa deve ser considerado.

A potência dissipada na resistência série e na reatância de dispersão do primário pode ser calculada como segue:

$$\begin{aligned} S_{perdas1} &= |I_1|^2 \times (R_1 + jX_{d1}) = (4,712)^2 \times (0,6 + j0,229) \\ S_{perdas1} &= 13,322 + j5,084 \text{ VA} \end{aligned} \quad (3.19)$$

A parte real da potência calculada na Equação (3.19) corresponde às perdas no cobre P_{R1} , enquanto as perdas pelo fluxo disperso no enrolamento Q_{d1} são fornecidas pela parte imaginária da mesma equação.

Se for subtraída a queda de tensão no enrolamento, encontra-se a tensão induzida \dot{E}_1 no ramo *shunt* do circuito equivalente que é o fator determinante para a definição das perdas no núcleo.

$$\dot{E}_1 = \dot{V}_1 - I_1(R_1 + jX_{d1}) = 97,52 \angle -1,08^\circ \text{ V} \quad (3.20)$$

Finalmente, as perdas por histerese e correntes parasitas são calculadas a partir da tensão calculada e da resistência do núcleo obtida através do ensaio a vazio:

$$P_c = \frac{|\dot{E}_1|^2}{R_c} = \frac{(97,52)^2}{3960} = 2,402 \text{ W} \quad (3.21)$$

Também é possível calcular as perdas que ocorrem no enrolamento secundário a partir das medições feitas. Usando-se um raciocínio análogo ao do primário obtêm-se as perdas na resistência série R_2 e na reatância de dispersão X_{d2} através da corrente de carga medida:

$$S_{perdas2} = |i_2|^2 \times (R_2 + jX_{d2}) = (4,653)^2 \times (0,8 + j0,229)$$

$$S_{perdas2} = 17,317 + j4,957 \text{ VA} \quad (3.22)$$

Assim, a parte real da potência calculada na Equação (3.22) corresponde às perdas no cobre P_{R2} , enquanto as perdas pelo fluxo disperso no enrolamento Q_{d2} são fornecidas pela parte imaginária da mesma equação.

Os resultados para todas as medições realizadas são apresentados nas Tabelas 3.7 e 3.8.

Tabela 3.7 - Cálculo das perdas no primário para transformador operando com carga resistiva

v_1 [V]	i_1 [A]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	P_{R1} [W]	Q_{d1} [Var]
24,34	2,262	55,040	1,963	3,072	1,172
49,80	3,184	158,51	4,428	6,083	2,322
75,47	4,013	302,78	5,673	9,661	3,687
100,35	4,712	472,85	0	13,322	5,084
127,81	5,411	691,49	10,675	17,567	6,705
153,33	6,039	925,57	28,307	21,884	8,352
181,40	6,548	1186,5	52,666	25,720	9,816
201,08	6,951	1396,8	47,549	28,986	11,063
210,58	7,124	1501,2	0	30,493	11,638
219,98	7,292	1603,2	48,819	31,898	12,174
229,04	7,470	1710,3	49,333	33,484	12,780
239,39	7,682	1836,1	105,27	35,412	13,516
251,25	7,900	1986,0	0	37,488	14,308

Tabela 3.8 - Cálculo das perdas no secundário e no núcleo para transformador operando com carga resistiva

v_2 [V]	i_2 [A]	P_2 [W]	Q_2 [Var]	P_{R2} [W]	Q_{d2} [Var]	P_c [W]
19,87	2,242	44,524	1,354	4,021	1,151	0,133
46,18	3,177	146,73	0	8,076	2,312	0,579
70,49	3,996	280,99	19,912	12,776	3,657	1,348
94,47	4,653	439,53	0	17,317	4,957	2,402
126,58	5,399	685,97	0	23,495	6,725	3,917
153,41	6,044	927,27	0	29,228	8,366	5,657
173,30	6,536	1134,0	0	34,255	9,805	7,948
191,18	6,880	1315,3	13,350	37,870	10,840	9,787
199,67	6,998	1397,8	0	39,206	11,223	10,748
209,58	7,195	1507,4	37,787	41,411	11,854	11,734
218,85	7,404	1618,9	66,593	43,850	12,552	12,729
226,82	7,262	1645,8	69,292	42,194	12,078	13,909
240,37	7,804	1873,3	99,794	48,728	13,948	15,346

Como já era esperado, as perdas ôhmicas e por dispersão de fluxo são muito maiores em relação às calculadas para o funcionamento do transformador sem carga em virtude do aumento da corrente que circula em ambos os enrolamentos. Isso também causa uma elevação na potência fornecida pela fonte de alimentação.

As perdas no núcleo apresentam valores muito semelhantes aos anteriores para os respectivos níveis de tensão, corroborando a ideia de que a corrente de excitação mantém sua ordem de grandeza, independentemente da carga que está conectada no transformador, e que as perdas por histerese e correntes parasitas são proporcionais ao fluxo mútuo e, conseqüentemente, à tensão aplicada na alimentação do mesmo.

Deve-se ressaltar que se forem analisadas as potências e correntes, medidas no secundário, chega-se a valores de resistência de carga maiores que o observado

antes da energização do circuito, proporcionalmente ao aumento da tensão de alimentação. Uma explicação plausível para este fato é que com a passagem cada vez maior de corrente ocorre o aquecimento do filamento das lâmpadas e, conseqüentemente, acontece a elevação da resistividade do material. Logo, conclui-se que a resistência das lâmpadas incandescentes não é linear e não deveria ter sido considerada como uma carga de impedância constante, pois isso pode ser uma fonte de erros em ensaios com variação na tensão de alimentação. O mais correto seria fazer uma modelagem da carga baseada na potência, com uma resistência variável de acordo com o nível de tensão.

É curioso notar que, para alguns valores de tensão, a potência de saída nos terminais do enrolamento secundário do transformador não é somente ativa para alguns valores de tensão. Essa situação não seria a natural, uma vez que a carga é puramente resistiva, mas pode ser explicada se a coleta dos dados tiver sido feita antes da estabilização da leitura do osciloscópio com o valor real, nos momentos de variação no sinal de alimentação.

Na sequência serão apresentadas algumas das formas de onda de potência complexa medidas no primário e secundário com o osciloscópio.

A Figura 3.29 mostra a forma de onda da potência instantânea no primário para tensão de 100,35 V e a Figura 3.30 apresenta a respectiva forma de onda da potência instantânea no secundário.

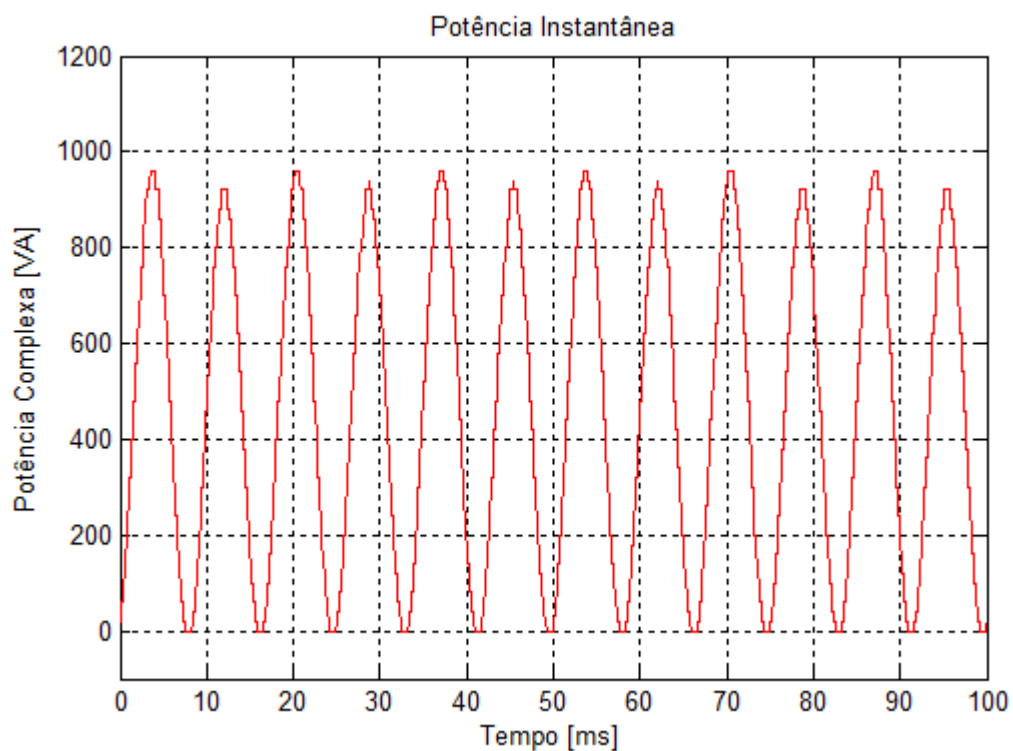


Figura 3.29 – Potência medida no primário para tensão de alimentação de 100,35 V e carga resistiva

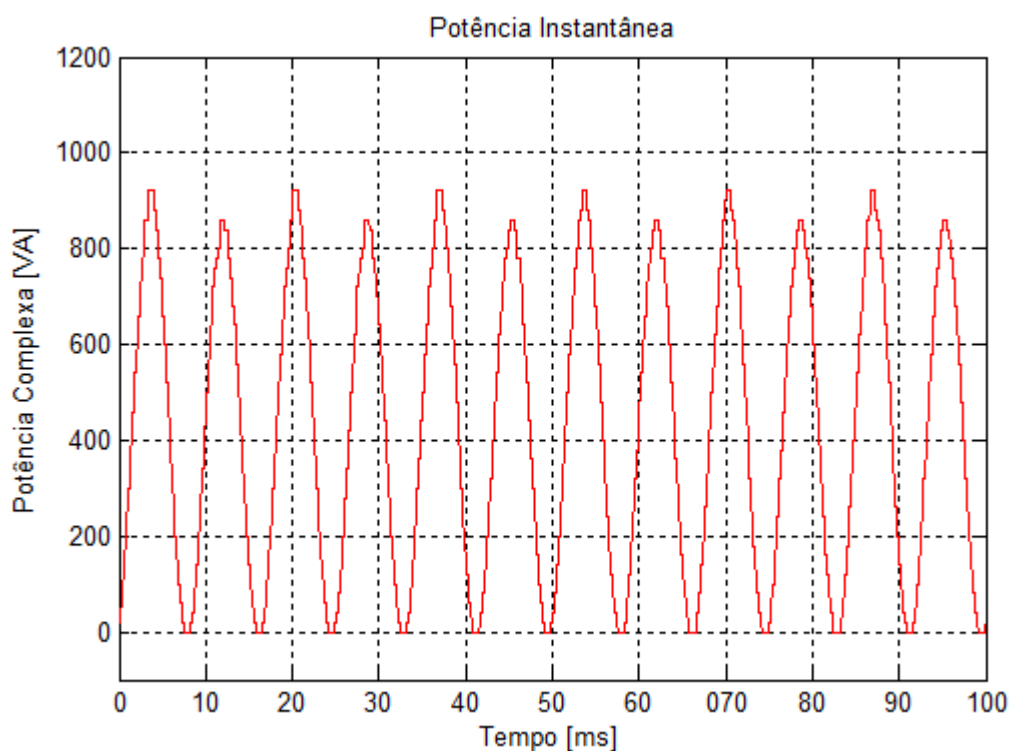


Figura 3.30 - Potência medida no secundário para tensão de alimentação de 100,35 V e carga resistiva

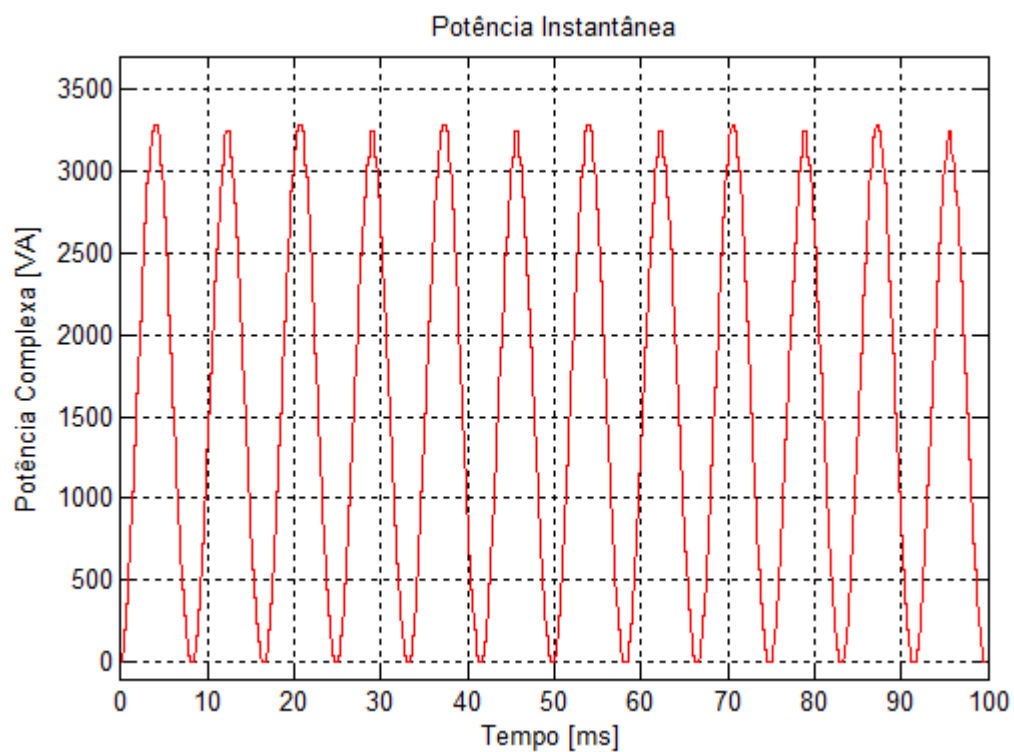


Figura 3.31 - Potência medida no primário para tensão de alimentação de 219,98 V e carga resistiva

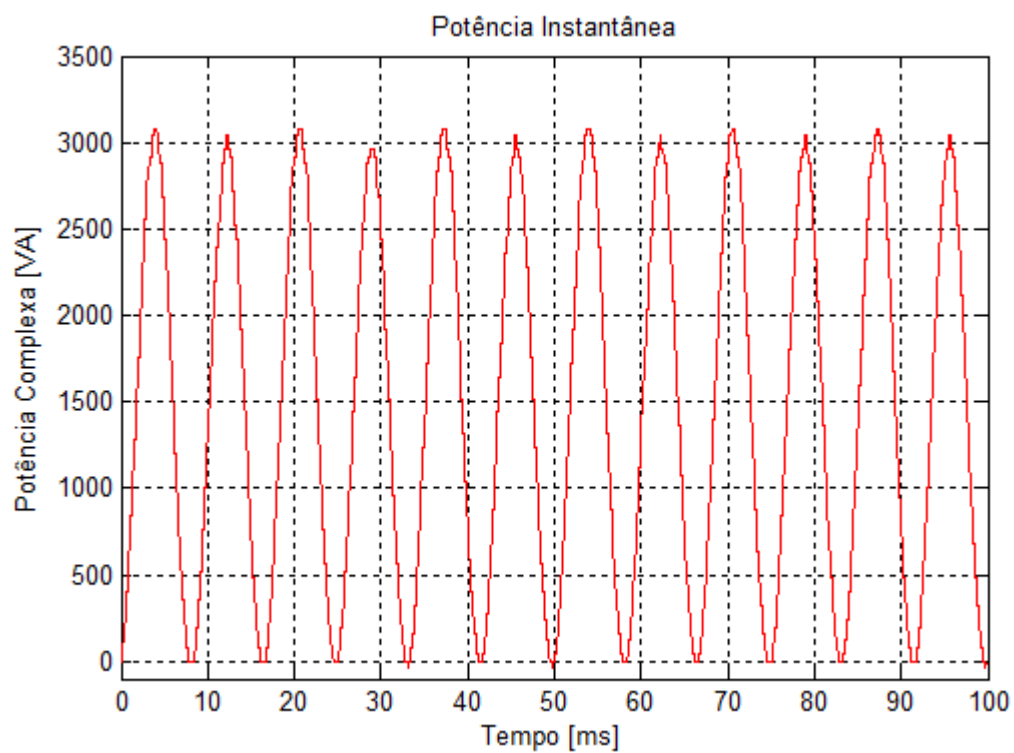


Figura 3.32 - Potência medida no secundário para tensão de alimentação de 219,98 V e carga resistiva

A Figura 3.31 mostra a forma de onda da potência instantânea no primário para tensão de 219,98 V e a Figura 3.32 apresenta a respectiva forma de onda da potência instantânea no secundário.

Embora a diferença entre as amplitudes de picos consecutivos, apresentada nas formas de onda de potência instantânea, mostradas nas figuras anteriores não seja muito grande, ela evidencia a presença dos harmônicos que foram desconsiderados para o cálculo das perdas. Como foi dito, essas componentes representam uma pequena parcela nos sinais de tensão e corrente, principalmente neste último, e devem ter sido produzidas pela não linearidade do material ferromagnético ou até mesmo por ruídos nas medições realizadas.

3.6.3 Carga Indutiva

O indutor utilizado como carga foi fabricado no laboratório de circuitos elétricos do DEE da UFRJ e apresenta resistência DC de $580\ \Omega$ com uma indutância de 1 H.

O procedimento utilizado será exatamente o mesmo realizado para as medições com carga resistiva, desconsiderando a pequena distorção harmônica das ondas de corrente e tensão.

O desenvolvimento seguinte corresponde aos cálculos para uma alimentação de aproximadamente 100 V.

Os dados coletados através do osciloscópio foram:

- Potência Aparente no primário: $S_1 = 17,804\ VA$;
- Potência Ativa no primário: $P_1 = 14,670\ W$;
- Potência Reativa no primário: $Q_1 = 10,087\ VAR$;
- Tensão no primário: $v_1 = 100,72\ V$;
- Corrente no primário: $i_1 = 166,77\ mA$;
- Potência Aparente no secundário: $S_2 = 13,442\ VA$;
- Potência Ativa no secundário: $P_2 = 11,368\ W$;
- Potência Reativa no secundário: $Q_2 = 7,174\ VAR$;
- Tensão no secundário: $v_2 = 99,81\ V$;
- Corrente no secundário: $i_2 = 134,68\ A$;

Considerando a tensão no primário como referência, pode-se calcular a corrente fasorial neste enrolamento como segue:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1^* &= \frac{S_1}{\dot{V}_1} = \frac{(P_1 + jQ_1)}{\dot{V}_1} = \frac{14,670 + j10,087}{100,72 \angle 0^\circ} = 0,17677 \angle 34,51^\circ \\ \dot{I}_1 &= 176,77 \angle -34,51^\circ \text{ mA} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Como era esperado, por se tratar de um circuito predominantemente indutivo, a corrente é atrasada em relação à respectiva tensão.

As potências consumidas sob a forma de perdas por efeito Joule na resistência e dispersão de fluxo no enrolamento primário são:

$$\begin{aligned} S_{perdas1} &= |\dot{I}_1|^2 \times (R_1 + jX_{d1}) = (0,17676)^2 \times (0,6 + j0,229) \\ S_{perdas1} &= 0,0187 + j0,0072 \text{ VA} \end{aligned} \quad (3.24)$$

A FEM induzida após a queda de tensão no enrolamento primário será:

$$\dot{E}_1 = \dot{V}_1 - \dot{I}_1(R_1 + jX_{d1}) = 100,61 \angle -0,02^\circ \text{ V} \quad (3.25)$$

Essa tensão, em conjunto com a resistência das perdas do núcleo, fornece as perdas por histerese e correntes parasitas no transformador, como mostrado pela Equação (3.26):

$$P_c = \frac{|\dot{E}_1|^2}{R_c} = \frac{(100,61)^2}{3960} = 2,556 \text{ W} \quad (3.26)$$

Por fim, as perdas no enrolamento secundário são calculadas com base na resistência série e reatância de dispersão, obtidas no ensaio de curto-circuito, e na corrente de carga que percorre esse enrolamento:

$$S_{perdas2} = |i_2|^2 \times (R_2 + jX_{d2}) = (0,13468)^2 \times (0,8 + j0,229)$$

$$S_{perdas2} = 0,0145 + j0,0042 \text{ VA} \quad (3.27)$$

As Tabelas 3.9 e 3.10 reúnem os resultados calculados para todos os dados obtidos com a carga indutiva:

Tabela 3.9 - Cálculos das perdas no primário para transformador operando com carga indutiva

v_1 [V]	i_1 [mA]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	P_{R1} [W]	Q_{d1} [Var]
24,87	58,218	0,991	1,055	0,0020	0,0008
50,08	98,913	3,819	3,154	0,0059	0,0022
75,50	139,36	8,447	6,273	0,0117	0,0044
100,72	176,77	14,670	10,087	0,0187	0,0072
129,71	214,25	23,230	15,255	0,0275	0,0105
155,38	239,64	31,343	20,102	0,0345	0,0132
182,17	265,83	40,490	26,565	0,0424	0,0162
200,68	283,48	46,703	32,484	0,0482	0,0184
211,12	287,40	48,931	35,879	0,0496	0,0189
221,35	297,99	51,678	40,993	0,0533	0,0203

Tabela 3.10 - Cálculos das perdas no secundário e no núcleo para transformador operando com carga indutiva

v_2 [V]	i_2 [mA]	P_2 [W]	Q_2 [Var]	P_{R2} [W]	Q_{d2} [Var]	P_c [W]
24,78	45,86	0,758	0,846	0,0017	0,0005	0,156
50,00	41,92	1,288	1,653	0,0014	0,0004	0,632
75,43	106,52	6,598	4,585	0,0091	0,0026	1,436
99,81	134,68	11,368	7,174	0,0145	0,0042	2,556
129,86	162,21	18,363	10,319	0,0210	0,0060	4,240
154,81	169,06	23,693	11,120	0,0229	0,0065	6,085
181,78	185,92	30,841	13,820	0,0277	0,0079	8,635
198,75	186,17	34,506	13,361	0,0277	0,0079	10,152
212,00	180,90	36,116	12,902	0,0262	0,0075	11,236
220,00	178,01	37,028	12,753	0,0254	0,0073	12,352

É preciso salientar que as medições com a carga indutiva conectada no transformador só foram realizadas até a tensão de 220 V para evitar o aquecimento demasiado do indutor utilizado.

A partir da comparação dos resultados apresentados nas tabelas anteriores, percebe-se que as perdas, tanto ôhmicas quanto por fluxo disperso em ambos os enrolamentos na situação de carga indutiva, são inferiores àquelas obtidas na operação com carga resistiva e ligeiramente superiores às calculadas com o secundário sem carga. Essa constatação pode ser explicada pela, relativamente, baixa corrente requerida pela carga em virtude da elevada impedância do indutor

utilizado e também pelo baixo fator de potência apresentado pelo circuito, uma vez que o transformador e a carga utilizada tem característica majoritariamente indutiva. Outra consequência desta reduzida corrente é a baixa potência consumida da rede externa que alimenta o transformador.

Mais uma vez, as perdas no núcleo apresentaram valores muito semelhantes aos calculados anteriormente, indo de encontro à teoria que atesta que a corrente de excitação se eleva apenas até o valor necessário para estabelecer o fluxo mútuo que circula no núcleo do transformador.

Para finalizar, abaixo são mostradas algumas formas de onda da potência instantânea, calculada pelo aplicativo do osciloscópio, no primário e secundário do equipamento funcionando com carregamento indutivo.

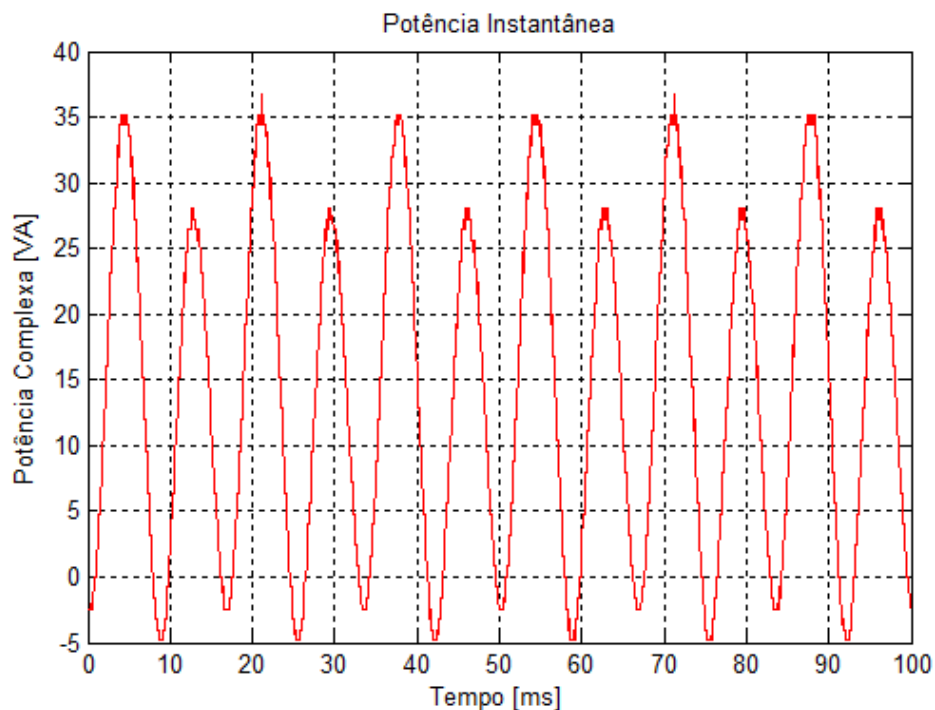


Figura 3.33 - Potência medida no primário para tensão de alimentação de 100,72 V e carga indutiva

A Figura 3.33 mostra a forma de onda da potência instantânea no primário para tensão de 100,72 V e a Figura 3.34 apresenta a respectiva forma de onda da potência instantânea no secundário.

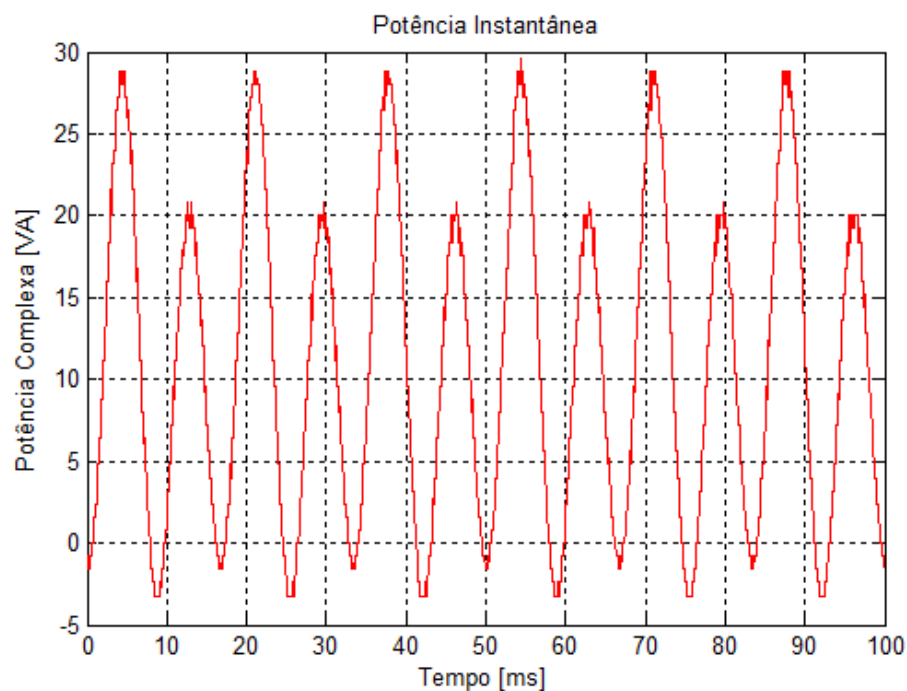


Figura 3.34 - Potência medida no secundário para tensão de alimentação de 100,72 V e carga indutiva

A Figura 3.35 mostra a forma de onda da potência instantânea no primário para tensão de 221,35 V e a Figura 3.36 apresenta a respectiva forma de onda da potência instantânea no secundário.

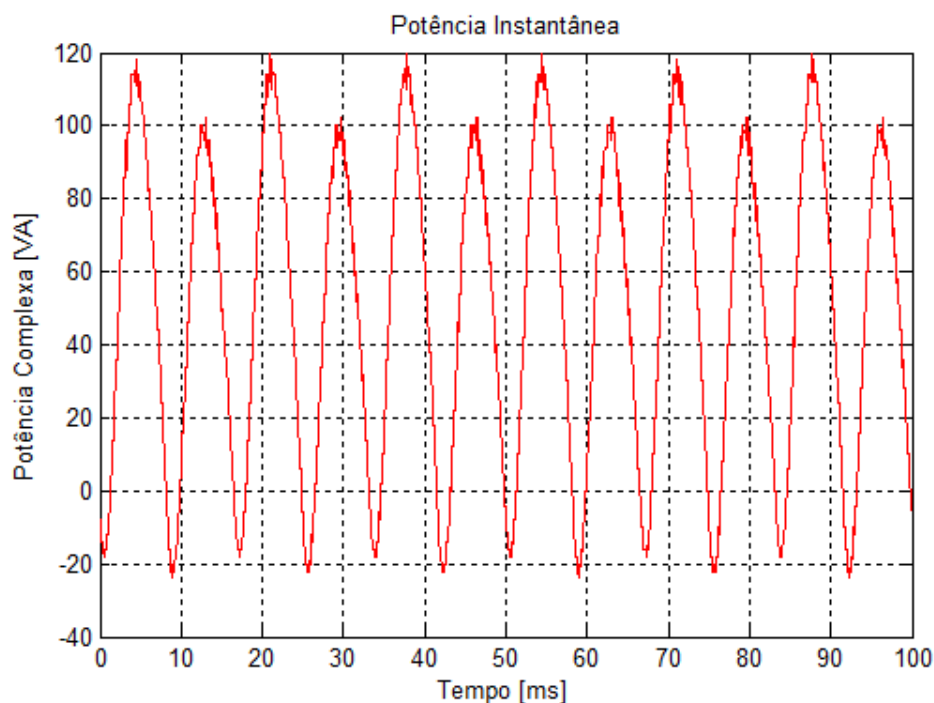


Figura 3.35 - Potência medida no primário para tensão de alimentação de 221,35 V e carga indutiva

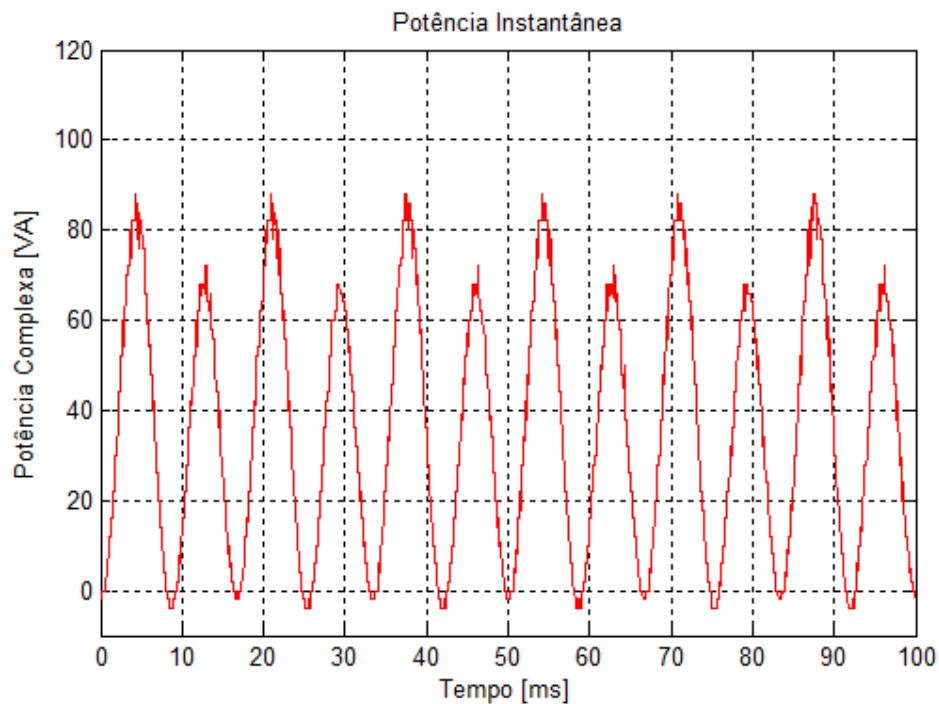


Figura 3.36 - Potência medida no secundário para tensão de alimentação de 221,35 V e carga indutiva

Em todas as figuras anteriores nota-se visivelmente uma diferença entre os valores de pico da potência instantânea produzida no semiciclo positivo e no semiciclo negativo do sinal de tensão. Isso pode ser explicado, assim como na operação com carga resistiva, pelo conteúdo harmônico presente nos sinais, de tensão e corrente, medidos com o osciloscópio. Embora essas componentes terem sido desprezadas sem prejuízo para o cálculo das perdas, elas são evidenciadas nas formas de onda e podem ter sido causadas pela não linearidade inerente ao núcleo do transformador.

4 Simulações e Comparações

Para comprovar a eficácia das medições feitas com o osciloscópio, e se o circuito equivalente construído apresenta uma reprodução aceitável do funcionamento do equipamento estudado, foram realizadas simulações com o software *Simulink* do MATLAB. Essas simulações visaram definir as perdas no transformador monofásico, para as mesmas condições de operação consideradas na Seção 3.6, para posterior comparação com os resultados obtidos em laboratório.

O circuito utilizado nas simulações, mostrado na Figura 4.1, é o circuito equivalente do transformador ensaiado, cujos parâmetros foram obtidos através dos ensaios de curto-circuito e a vazio e foram representados na Figura 3.5. A única mudança realizada foi o ajuste do valor da reatância de magnetização do núcleo X_m de acordo com a tensão de entrada.

Dessa forma, ao invés de se utilizar apenas o parâmetro calculado para as condições normais de operação, a cada amplitude do sinal de alimentação será utilizado o valor de X_m encontrado durante o ensaio a vazio com as condições mais próximas. Isso foi feito para incluir no modelo os diferentes níveis de saturação que os domínios magnéticos do núcleo apresentam de acordo com a elevação da tensão aplicada. Todos os demais parâmetros foram considerados constantes para todas as simulações.

Vale ressaltar que a carga será alterada de acordo com a situação de operação que for reproduzida, podendo ser nula, resistiva ou indutiva.

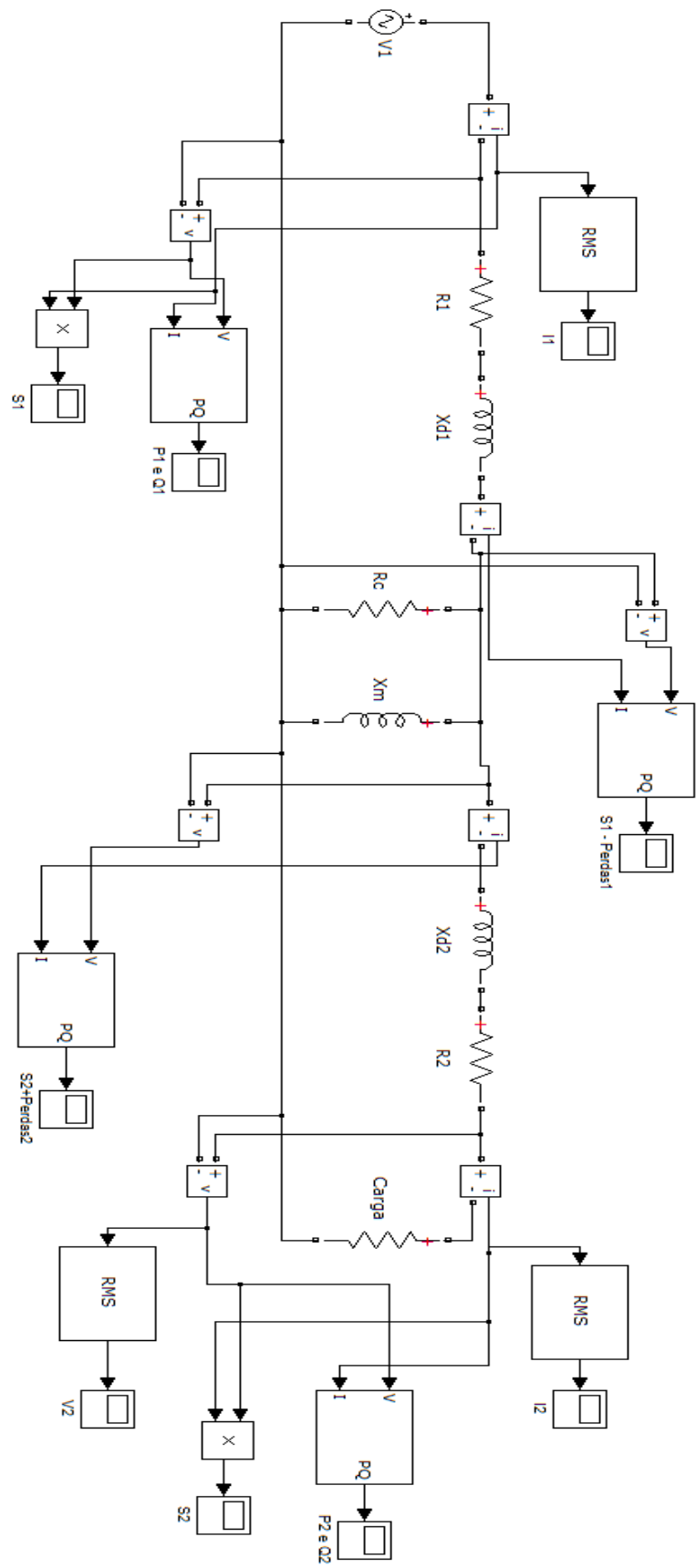


Figura 4.1 – Circuito utilizado nas simulações

4.1 Sem Carga

Os resultados encontrados nas simulações sem carga, utilizando os mesmos valores de tensão de entrada medidos com o osciloscópio em bancada, estão expostos na Tabela 4.1. Vale destacar que os valores de tensão e corrente mostrados são valores eficazes e que todos os resultados foram obtidos a partir de blocos de medição pré-definidos do *Simulink*.

Tabela 4.1 – Resultados das Simulações para transformador sem carga

v_1 [V]	X_m [Ω]	i_1 [mA]	P_1 [W]	Q_1 [VAr]	P_c [W]	Q_m [VAr]
49,14	3,839	17,831	0,610	0,629	0,609	0,629
100,58	3,605	37,705	2,555	2,805	2,554	2,805
120,88	3,750	44,416	3,690	3,895	3,688	3,895
140,30	3,325	55,148	4,970	5,918	4,968	5,917
160,26	2,996	67,104	6,485	8,570	6,483	8,569
179,36	2,566	83,213	8,124	12,532	8,120	12,530
202,26	2,141	107,36	10,332	19,101	10,325	19,098
210,76	2,092	113,91	11,219	21,226	11,211	21,223
220,03	1,834	132,18	12,230	26,386	12,219	26,382
230,85	1,406	174,20	13,468	37,881	13,449	37,875
239,80	1,208	207,49	14,538	47,584	14,512	47,574
249,22	1,001	256,73	15,715	62,021	15,672	62,005
259,91	1,001	267,77	17,090	67,456	17,045	67,440

Tabela 4.2 – Comparação entre as perdas no núcleo obtidas por diferentes métodos

Tensão Aproximada [V]	Perdas no Núcleo para operação sem carga P_c [W]			Discrepância entre o maior e o menor valor [%]
	Medidas pelo Laço de Histerese	Calculadas a partir das Medições com Osciloscópio	Obtidas por Simulação	
50	0,733	0,766	0,609	20,50
100	2,921	2,863	2,554	15,18
120	3,604	3,974	3,688	12,56
140	4,658	5,272	4,968	11,65
160	6,193	6,737	6,483	8,07
180	7,769	8,352	8,120	6,98
200	9,837	10,513	10,325	6,43
210	11,574	11,427	11,211	3,14
220	12,648	12,526	12,219	3,39
230	13,732	13,923	13,449	3,40
240	15,408	15,141	14,512	5,81
250	16,994	16,738	15,672	7,78

Os resultados para as perdas por histerese e correntes parasitas, que ocorrem no núcleo do transformador, encontrados através dos três diferentes métodos apresentados neste trabalho (com base na área do laço de histerese, através de medições de potência com o osciloscópio e por meio de simulações) estão

condensados na Tabela 4.2. Através da análise dessa tabela é possível perceber que os resultados apresentaram uma convergência aceitável, sendo que as maiores discrepâncias foram notadas nos níveis de tensão mais afastados da tensão nominal. No caso da tensão de 50 V, o mais crítico, o erro pode ser explicado pela utilização de um valor de reatância de magnetização que não corresponde às condições exatas da simulação, uma vez que esse valor não foi calculado durante o ensaio a vazio e foi preciso utilizar o parâmetro X_m da tensão que mais se aproximasse. Nos demais casos, as diferenças podem ser atribuídas à dificuldade de obtenção do ciclo de histerese para os níveis mais baixos de tensão e também à desconsideração da região saturada para o cálculo da área do laço de histerese nas tensões mais elevadas.

As formas de onda mostradas nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 representam as potências complexas para alguns casos. Apesar de não apresentarem a distorção dos sinais obtidos na prática, os valores de amplitude de ambos são bem próximos. Essa diferença no formato das ondas pode ser explicada porque, embora apresente a correção para o valor médio da reatância de magnetização do núcleo, o modelo do circuito equivalente não considera a relação entre a corrente de excitação e o fluxo mútuo, dada pelo laço de histerese.

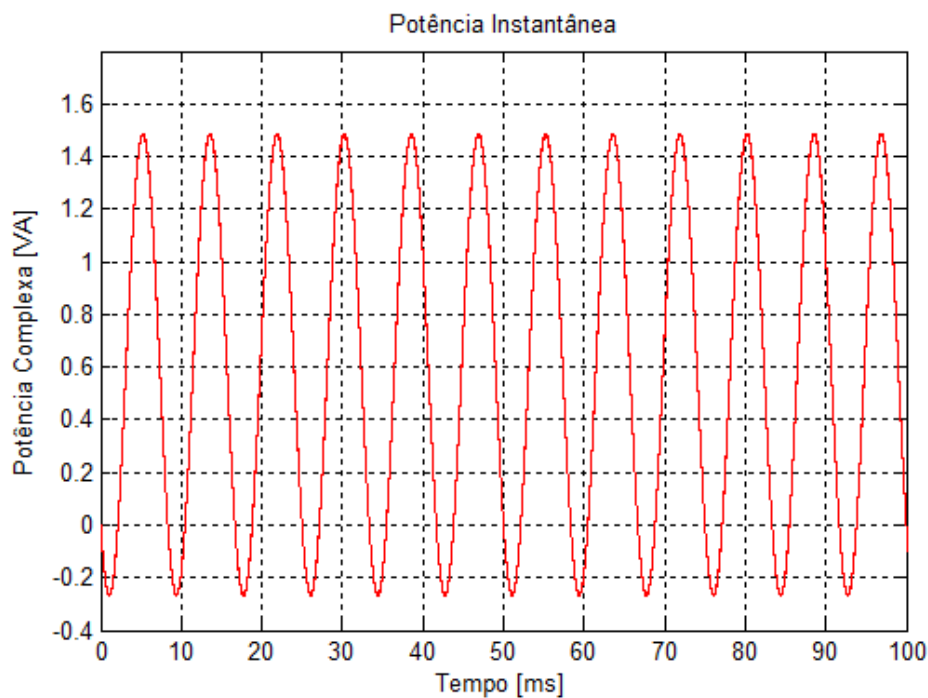


Figura 4.2 - Potência simulada para tensão de 49,14 V e operação a vazio

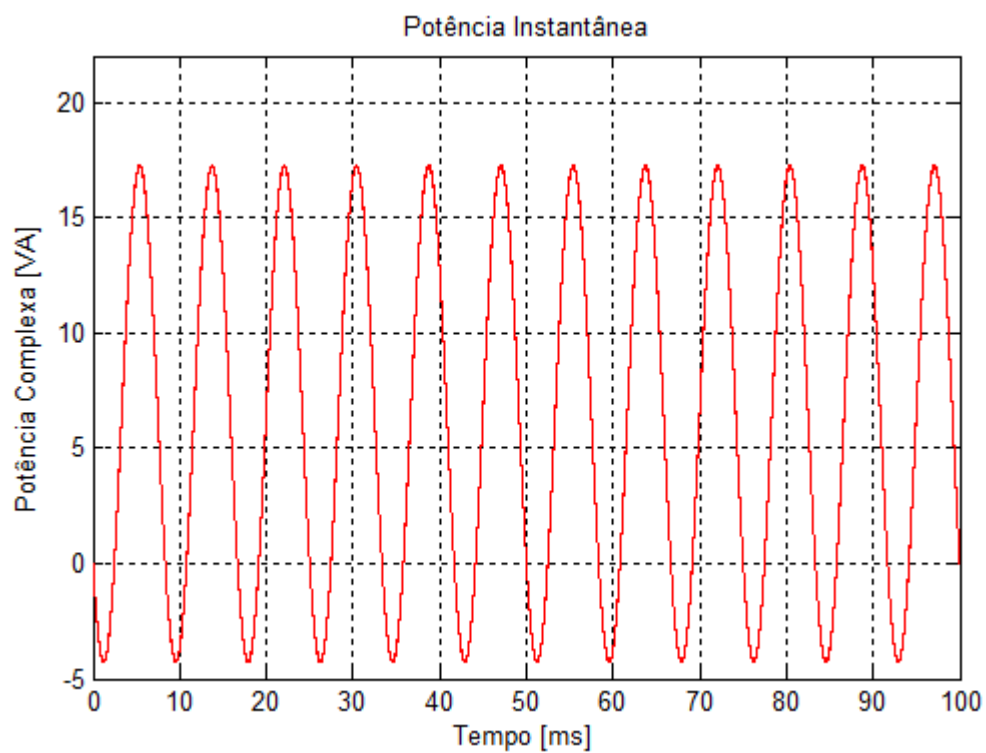


Figura 4.3 - Potência simulada para tensão de 160,26 V e operação a vazio

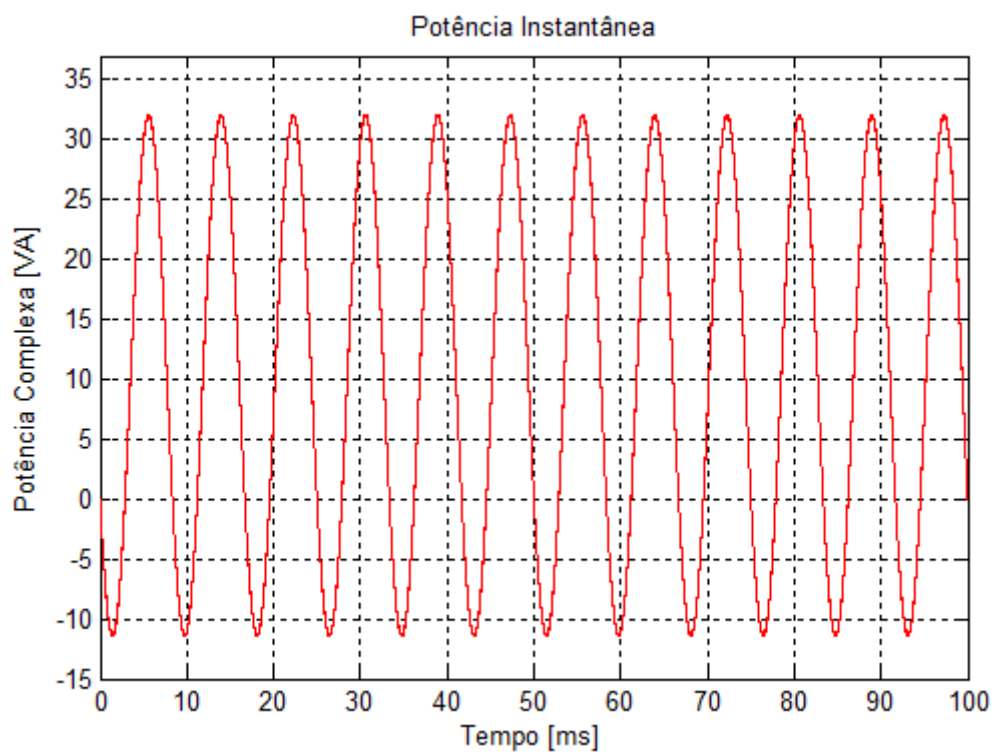


Figura 4.4 - Potência simulada para tensão de 202,26 V e operação a vazio

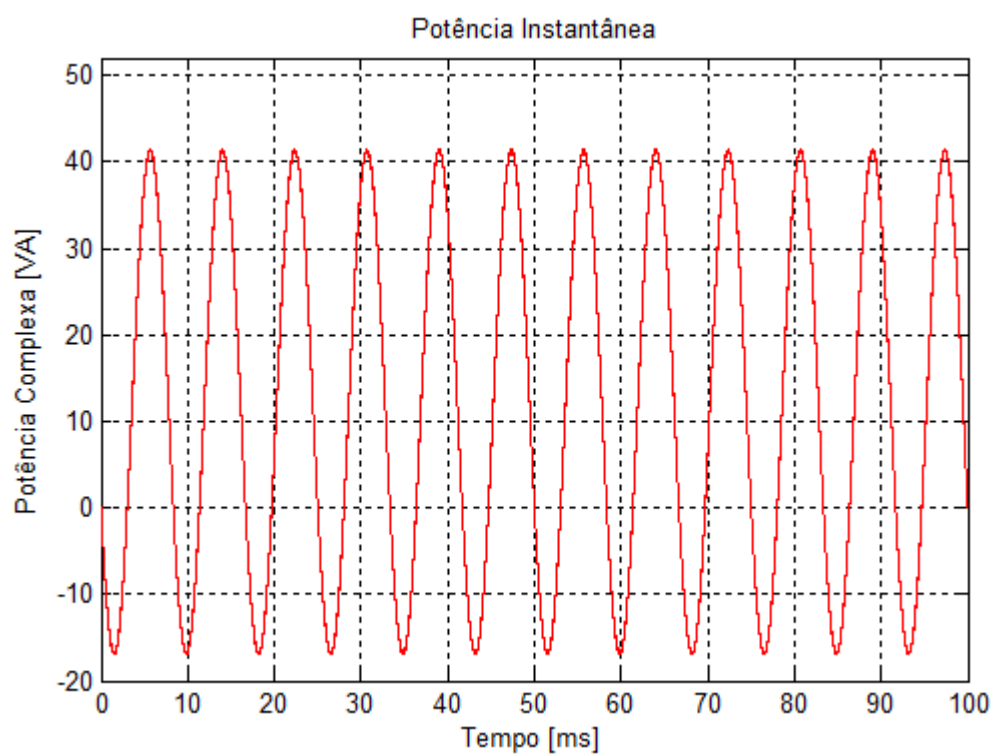


Figura 4.5 - Potência simulada para tensão de 220,03 V e operação a vazio

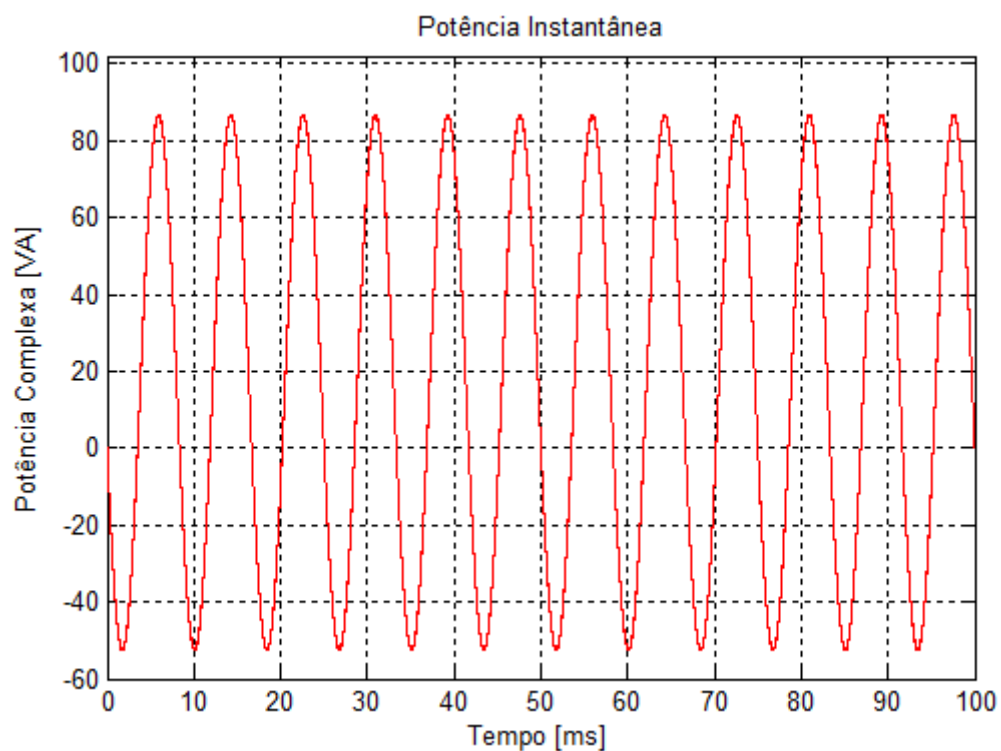


Figura 4.6 - Potência simulada para tensão de 259,91V e operação a vazio

4.2 Carga Resistiva

Os resultados da Tabela 4.3 foram obtidos de forma semelhante aos alcançados para as simulações sem carga conectada ao ao circuito equivalente. A diferença é que desta vez, além da introdução da resistência na saída do transformador, foram registrados os resultados para ambos os enrolamentos, permitindo que a potência de perdas no núcleo e a potência de magnetização sejam calculadas através da diferença entre as potências de primário e secundário, após serem consideradas as perdas no cobre e por reatância nos mesmos.

Tabela 4.3 - Resultados das Simulações para transformador com carga resistiva

v_1 [V]	X_m [Ω]	i_1 [A]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	v_2 [V]	i_2 [A]	P_2 [W]	Q_2 [Var]	P_c [W]
24,34	3,839	2,636	64,085	3,310	21,04	2,630	55,354	0	0,130
49,80	3,839	3,278	163,14	5,500	45,72	3,266	149,30	0	0,592
75,47	3,839	4,154	313,38	9,251	70,30	4,135	290,73	0	1,338
100,35	3,605	4,747	476,23	12,898	94,45	4,723	446,04	0	2,397
127,81	3,526	5,776	738,00	19,571	120,63	5,745	692,96	0	3,890
153,33	3,167	6,111	936,68	24,053	145,74	6,073	885,02	0	5,646
181,40	2,566	6,703	1215,40	32,671	173,08	6,657	1152,14	0	7,935
201,08	2,141	6,925	1391,97	39,884	192,48	6,875	1323,16	0	9,775
210,58	2,092	7,015	1476,51	42,686	201,87	6,961	1405,22	0	10,740
219,98	1,834	7,328	1611,22	49,700	210,88	7,272	1533,43	0	11,714
229,04	1,406	7,388	1691,09	60,610	219,86	7,329	1611,24	0	12,715
239,39	1,208	7,723	1847,30	72,633	229,79	7,660	1760,05	0	13,892
251,25	1,001	8,107	2034,73	90,380	241,16	8,039	1938,62	0	15,303

A comparação entre esses dados e as medições das Tabelas 3.7 e 3.8, resumida na Tabela 4.4, permite afirmar-se que os resultados foram muito similares. Novamente, nas medições com tensões localizadas nas extremidades da faixa de valores considerados, os erros foram mais acentuados por causa da utilização de reatâncias de magnetização aproximadas. Além disso, um fator a se destacar é a influência da mudança de temperatura do filamento das lâmpadas utilizadas nos testes reais, que provoca uma operação não linear e se torna uma restrição na utilização de lâmpadas em ensaios deste tipo. Por isso, o ideal seria a utilização de cargas com resistência constante como, por exemplo, resistores.

Tabela 4.4 - Comparação entre as perdas no núcleo obtidas por medição e simulação para operação com carga resistiva

Tensão [V]	Perdas no Núcleo para operação com carga resistiva P_c [W]		Discrepância [%]
	Calculadas a partir das Medições com Osciloscópio	Obtidas por Simulação	
24,34	0,133	0,130	2,26
49,80	0,579	0,592	2,20
75,47	1,348	1,338	0,74
100,35	2,402	2,397	0,21
127,81	3,917	3,890	0,69
153,33	5,657	5,646	0,19
181,40	7,948	7,935	0,16
201,08	9,787	9,775	0,12
210,58	10,748	10,740	0,07
219,98	11,734	11,714	0,17
229,04	12,729	12,715	0,11
239,39	13,909	13,892	0,12
251,25	15,346	15,303	0,28

As figuras a seguir correspondem às formas de onda da potência complexa simulada para as mesmas situações de operação mostradas na Seção 3.6.2. Dessa vez ambos os resultados são praticamente idênticos, tanto em relação à forma do sinal como em relação à amplitude.

A Figura 4.7 apresenta a forma de onda da potência no primário, simulada para uma alimentação de 100,35 V, com carga resistiva.

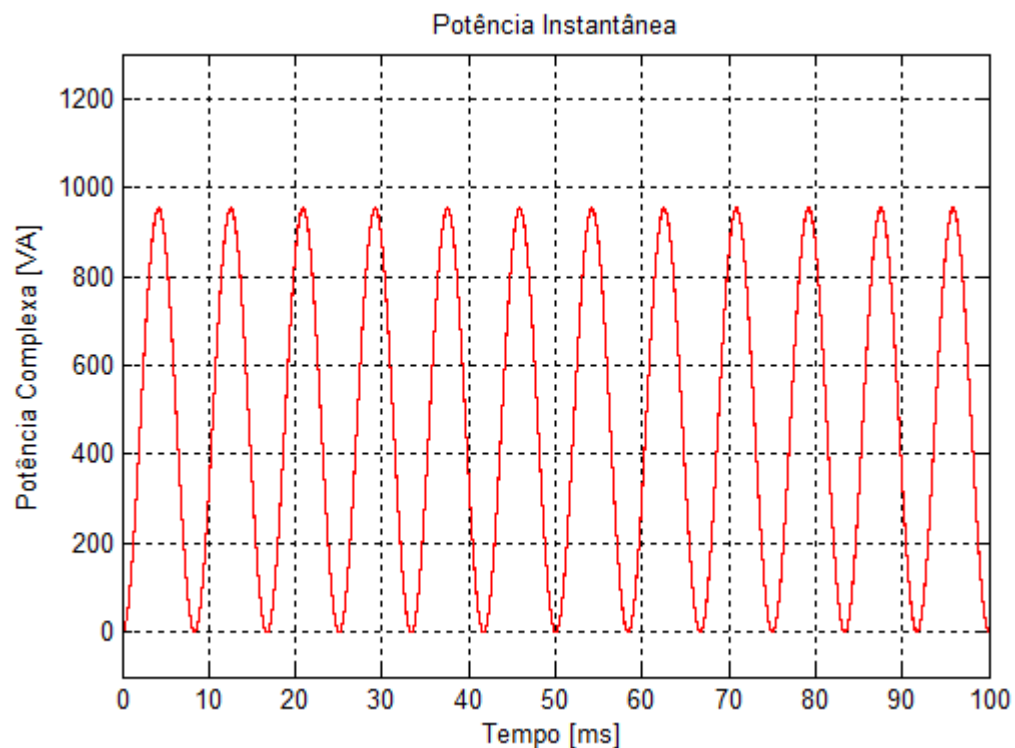


Figura 4.7 - Potência simulada no primário para tensão de alimentação de 100,35 V e carga resistiva

A Figura 4.8 apresenta a forma de onda da potência no secundário, simulada para uma alimentação de 100,35 V, com carga resistiva.

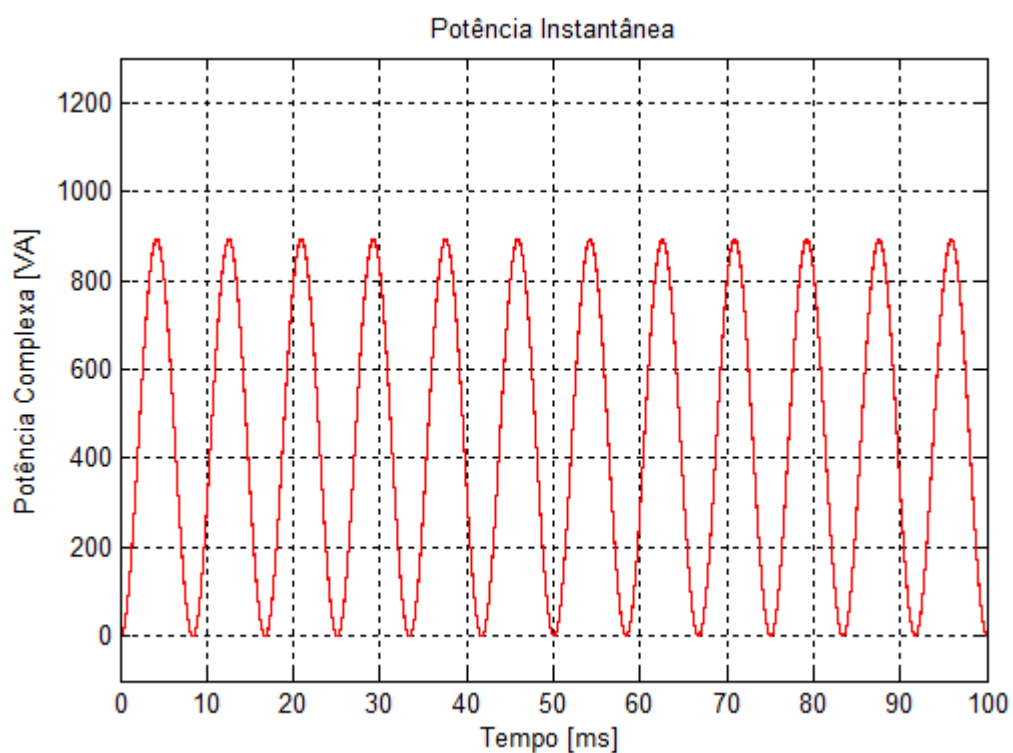


Figura 4.8 - Potência simulada no secundário para tensão de alimentação de 100,35 V e carga resistiva

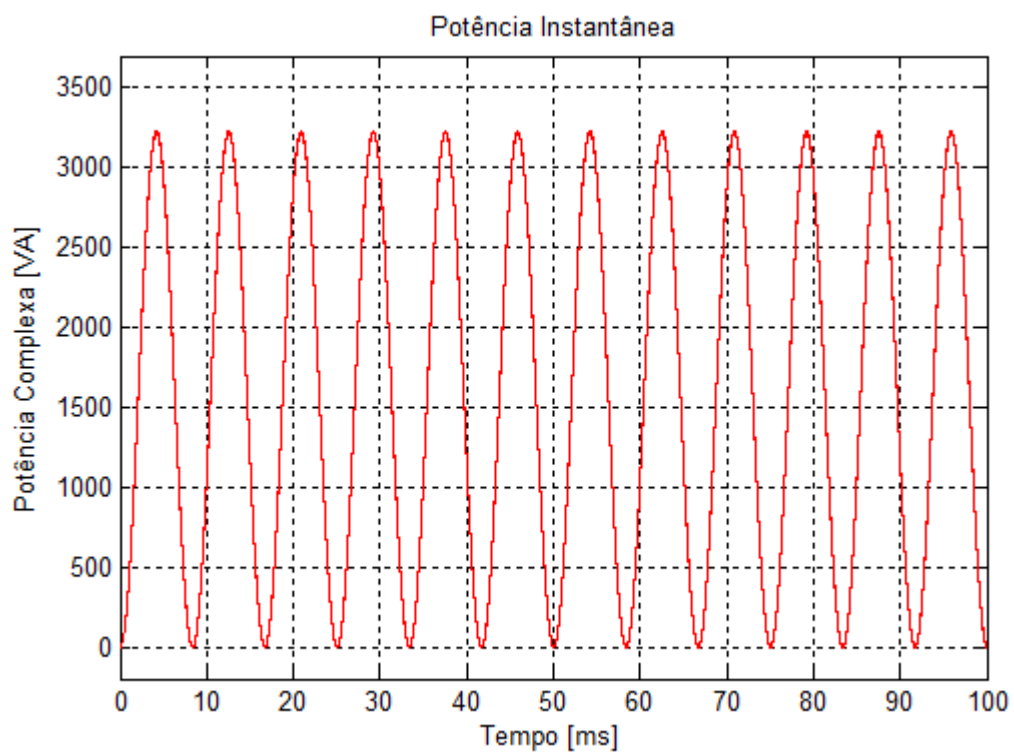


Figura 4.9 - Potência simulada no primário para tensão de alimentação de 219,98 V e carga resistiva

A Figura 4.9 apresenta a forma de onda da potência no primário, simulada para uma alimentação de 219,98 V, com carga resistiva.

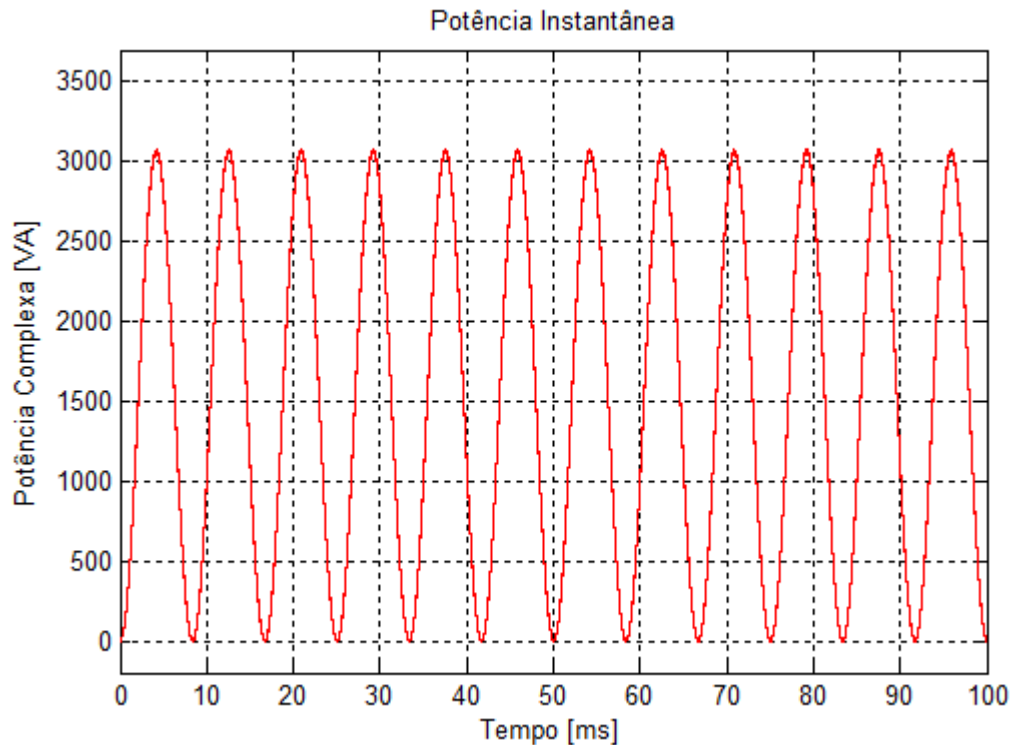


Figura 4.10 - Potência simulada no secundário para tensão de alimentação de 219,98 V e carga resistiva

A Figura 4.10 apresenta a forma de onda da potência no secundário, simulada para uma alimentação de 219,98 V, com carga resistiva.

4.3 Carga Indutiva

Para esta condição de carga foi introduzido um indutor de 1 H, em série com uma resistência de 580 Ω , como carga do circuito equivalente. Todo indutor na prática, por se tratar de um fio enrolado, possui uma determinada resistência à passagem de corrente, sendo inviável a consideração de um indutor ideal para representar o experimento prático. Por isso, essa resistência foi utilizada para representar a resistência física que o indutor real apresenta.

O procedimento realizado foi análogo ao da Seção 4.2 e os resultados estão mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados das Simulações para transformador com carga indutiva

v_1 [V]	X_m [Ω]	i_1 [mA]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	v_2 [V]	i_2 [mA]	P_2 [W]	Q_2 [Var]	P_c [W]
24,87	3,839	51,824	0,965	0,852	24,81	42,857	0,807	0,690	0,156
50,08	3,839	104,27	3,914	3,453	49,97	86,153	3,271	2,797	0,632
75,50	3,839	157,49	8,895	7,849	75,33	129,92	7,434	6,358	1,436
100,72	3,605	210,74	15,831	14,139	100,49	173,28	13,229	11,315	2,556
129,71	3,526	271,96	26,255	23,554	129,42	223,15	21,941	18,766	4,237
155,38	3,167	329,09	37,677	34,573	155,03	267,34	31,484	26,928	6,081
182,17	2,566	395,14	51,791	49,970	181,75	313,33	43,276	37,015	8,629
200,68	2,141	446,15	62,854	63,749	200,22	345,21	52,515	44,916	10,143
211,12	2,092	471,06	69,565	71,041	210,64	363,13	58,120	49,710	11,226
221,35	1,834	504,54	76,474	81,377	220,84	380,72	63,887	54,643	12,340

A comparação entre as medições práticas e os resultados simulados é apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Comparação entre as perdas no núcleo obtidas por medição e simulação para operação com carga indutiva

Tensão [V]	Perdas no Núcleo para operação com carga resistiva P_c [W]		Discrepância [%]
	Calculadas a partir das Medições com Osciloscópio	Obtidas por Simulação	
24,87	0,156	0,156	0
50,08	0,632	0,632	0
75,50	1,436	1,436	0
100,72	2,556	2,556	0
129,71	4,240	4,237	0,07
155,38	6,085	6,081	0,07
182,17	8,635	8,629	0,07
200,68	10,152	10,143	0,09
211,12	11,236	11,226	0,09
221,35	12,352	12,340	0,10

Desta vez, embora os demais valores tenham apresentado uma certa discrepância, os resultados da potência de perdas no núcleo foram extremamente similares aos obtidos nas Tabelas 3.9 e 3.10, apresentando uma tendência de divergência à medida que a amplitude da tensão aplicada aumenta. Essa característica, mais uma vez, indica a influência da elevação de temperatura na carga como mecanismo de introdução de erro nas simulações.

As figuras mostradas na sequência correspondem às formas de onda da potência complexa simuladas para as mesmas condições das medições laboratoriais. Apesar de as amplitudes dos sinais simulados se aproximarem dos valores medidos, as formas de onda se diferenciam no aspecto de diferença entre os valores de pico produzidos pelo semiciclo positivo ou negativo da onda de tensão. Uma explicação que pode ser assumida para esse acontecimento é que, em virtude da mudança do valor de resistência com a temperatura, o fator de potência do circuito também se altera e muda o aspecto da potência complexa, sendo que esse fenômeno não foi considerado durante as simulações, pois foram usados valores fixos para a resistência da carga.

A Figura 4.11 apresenta a forma de onda da potência no primário, simulada para uma alimentação de 100,72 V, com carga resistiva.

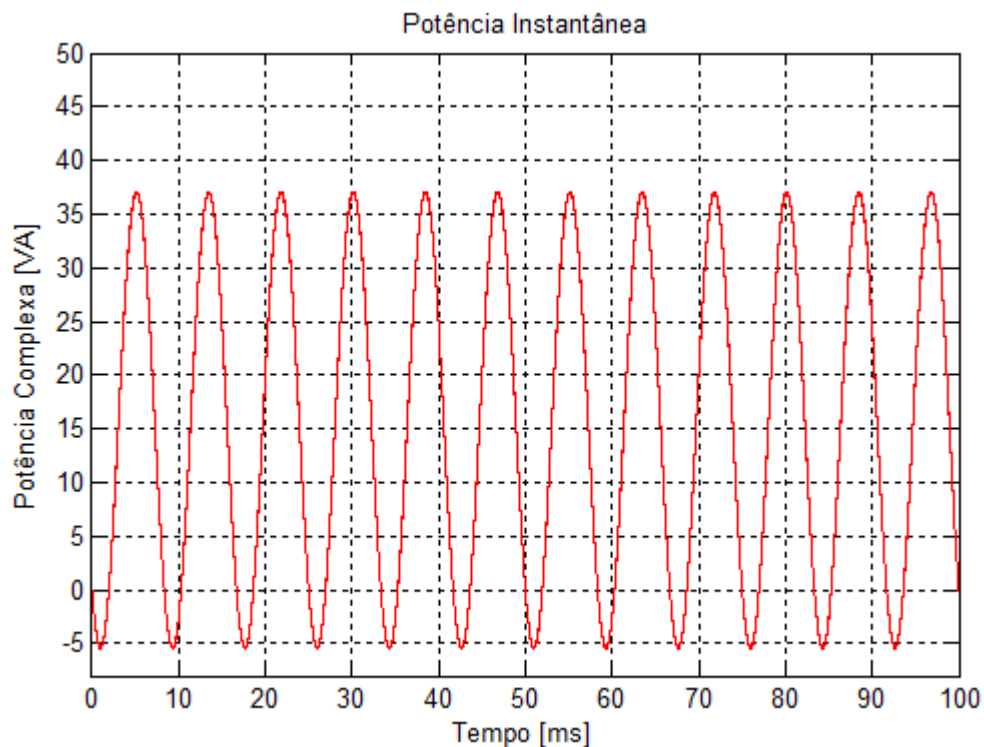


Figura 4.11 - Potência simulada no primário para tensão de alimentação de 100,72 V e carga indutiva

A Figura 4.12 apresenta a forma de onda da potência no secundário, simulada para uma alimentação de 100,72 V, com carga indutiva.

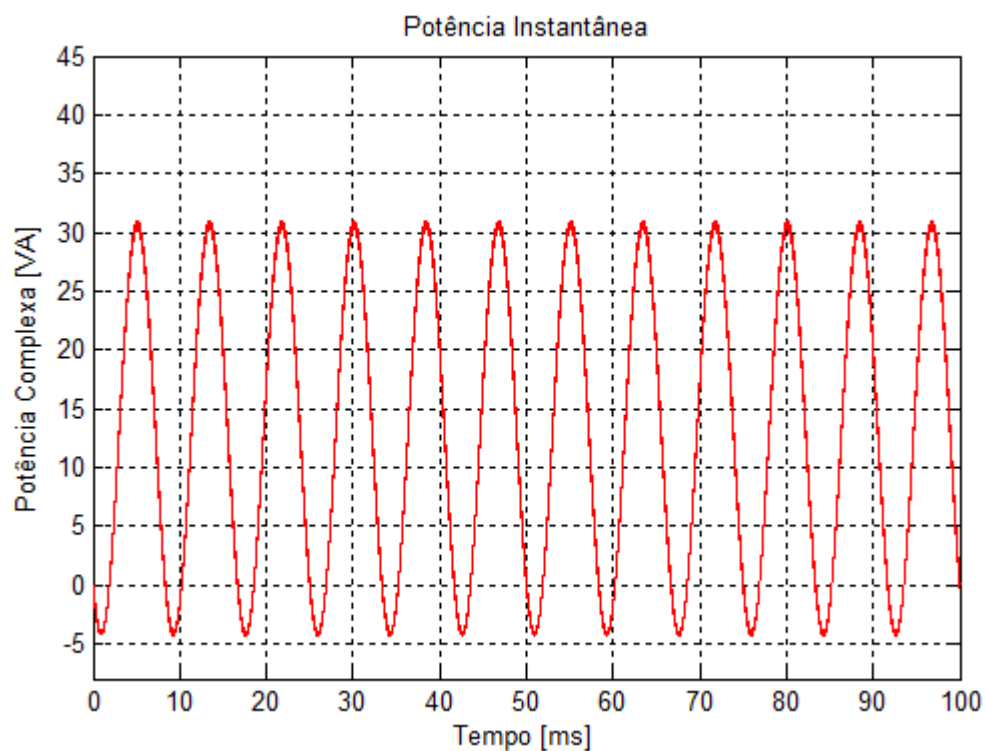


Figura 4.12 - Potência simulada no secundário para tensão de alimentação de 100,72 V e carga indutiva

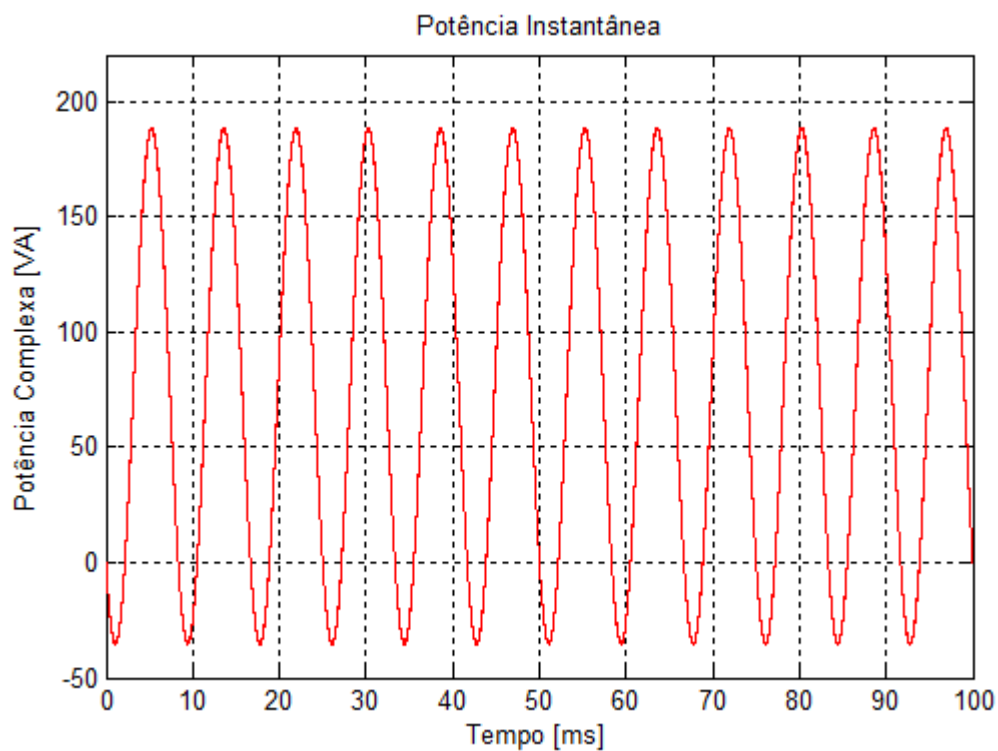


Figura 4.13 - Potência simulada no primário para tensão de alimentação de 221,35 V e carga indutiva

A Figura 4.13 apresenta a forma de onda da potência no primário, simulada para uma alimentação de 221,35 V, com carga indutiva.

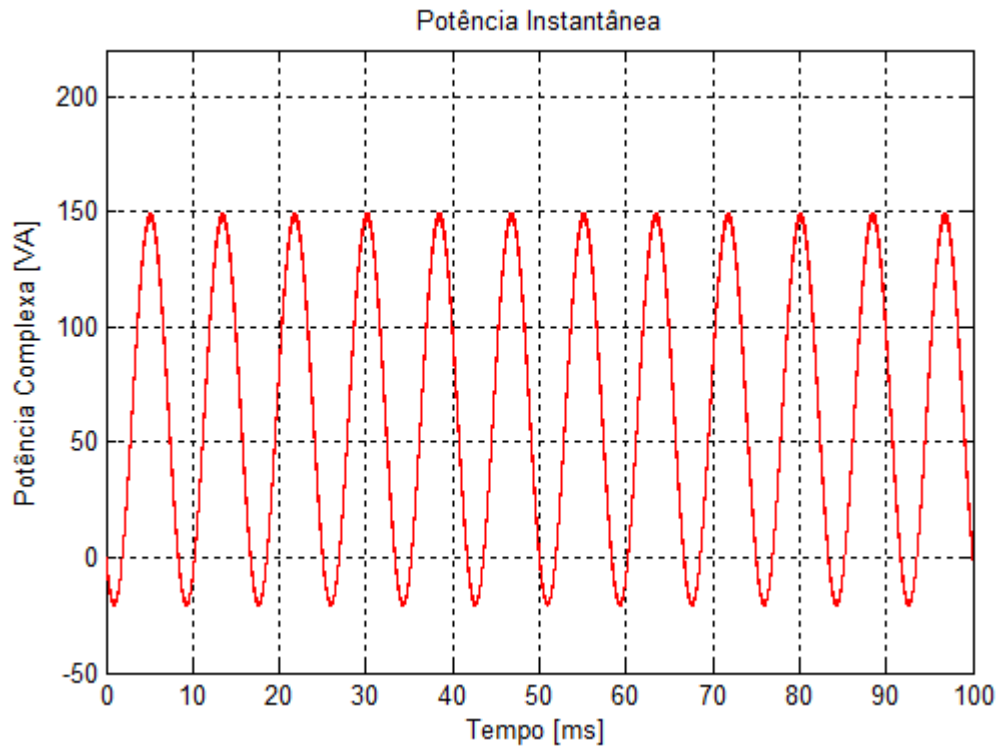


Figura 4.14 - Potência simulada no secundário para tensão de alimentação de 221,35 V e carga indutiva

A Figura 4.14 apresenta a forma de onda da potência no secundário, simulada para uma alimentação de 221,35 V, com carga indutiva.

5 Conclusões

5.1 Conclusões

O presente trabalho permitiu a comprovação da eficácia dos ensaios de curto-circuito e de circuito aberto na definição dos parâmetros necessários à elaboração de um circuito equivalente que represente o funcionamento do transformador monofásico. Esse último ensaio também foi usado para se verificar a distorção da corrente de excitação do equipamento, causada pela saturação dos domínios magnéticos que constituem o material do núcleo. As medições realizadas foram condizentes com a literatura existente, pois provaram que o fluxo mútuo, responsável pela transferência de potência entre os enrolamentos, é proporcional à tensão aplicada e tem sua taxa de crescimento sensivelmente reduzida quando atinge a região de saturação, requerendo uma corrente ainda mais distorcida quando opera nessas condições.

Em seguida, utilizou-se um circuito integrador RC para captura de uma curva que representa o laço de histerese do núcleo através de medições com o osciloscópio. Essas curvas apresentaram a forma típica e mostraram que as perdas no núcleo são proporcionais à alimentação do equipamento, podendo ser calculadas a partir do volume do núcleo de material ferromagnético e da área do laço de histerese para cada situação de alimentação com a ausência de carga conectada ao secundário do transformador.

Finalmente, foram realizadas medições de potência para três situações de carregamento distintas: sem carga, com carga resistiva e com carga indutiva. Esses dados permitiram a visualização do aumento das perdas nos dois enrolamentos, ôhmicas e por dispersão de fluxo, com o aumento da corrente que circula pelos mesmos. Além disso, foi comprovado que as perdas, por histerese e correntes parasitas no núcleo do transformador, estão relacionadas apenas ao fluxo variante no interior do material ferromagnético que, por sua vez, é definido pela frequência e tensão do sinal aplicado na entrada do equipamento. Essa relação depende das características físicas e construtivas do núcleo, não sendo influenciada pelo tipo de carga conectada no secundário. É importante ressaltar que, embora possam ter

ocorrido pequenas imprecisões, a análise feita via software baseada na aquisição de dados com o osciloscópio foi condizente com a teoria apresentada e mostrou-se como uma boa alternativa para determinadas aplicações na prática da engenharia.

Também foi desenvolvido um modelo com elementos simples para comprovar que o circuito equivalente obtido anteriormente pode representar, a partir da inclusão de pequenas modificações, com satisfatório grau de precisão o funcionamento do transformador monofásico, sendo uma preciosa ferramenta no estudo destes equipamentos.

5.2 Trabalhos Futuros

Seria interessante se, em trabalhos posteriores, fossem feitos estudos em transformadores de diferentes níveis de potência e trifásicos para estender as conclusões aqui feitas para uma maior gama de equipamentos. Pode-se sugerir também a utilização de transformadores com diferentes características de construção para avaliar a influência do material, estrutura e volume do núcleo no comportamento das perdas por histerese e correntes parasitas.

Também é possível se indicar a realização de ensaios que considerem a mudança de temperatura dos elementos envolvidos e estabeleçam fatores de correção que possam ser usados para aumentar a eficácia do modelo proposto.

Finalmente, recomenda-se a utilização de programas computacionais baseados no método de Elementos Finitos, sendo o *software* Maxwell um exemplo, para se realizar uma modelagem mais precisa do núcleo do transformador e, conseqüentemente, se obter resultados ainda melhores com relação à curva de histerese.

6 Referências Bibliográficas

- [1] FITZGERALD, A. E.; Kingsley Jr., C.; Umans, S. D. *Máquinas Elétricas*. 6^a ed. Porto Alegre, Bookman, 2006.
- [2] KOSOW, Irwing L. *Máquinas Elétricas e Transformadores*. 15^a ed. São Paulo, Globo, 2005.
- [3] OLIVEIRA, J.C.; COGO, J.R.; ABREU, J.P.G. *Transformadores: Teoria e Ensaio*. 2^a ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1984.
- [4] MARTIGNOLI, Alfonso. *Transformadores*. Porto Alegre, Editora Globo, 1971.
- [5] MARCELINO, G. V. "Análise e Medições das Sobrecorrentes de Energização de um Transformador Monofásico", Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Janeiro de 2011.
- [6] <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/do-laboratorio-para-a-fabrica/histerese-magnetica-perdas-e-ganhos> - Acessado em 02/02/2013.
- [7] DELGADO, R.S. "Estudo dos Requisitos Essenciais a Especificação de Transformadores de Potência em Condições Normais de Operação", Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março de 2010.
- [8] CHAPMAN, Stephen J. *Electric Machinery Fundamentals*. 2nd ed., Nova Iorque, McGraw Hill, 2001.
- [9] SADIKU, Matthew N. O. *Elementos de Eletromagnetismo*. 3^a ed. Porto Alegre, Bookman, 2004.
- [10] GUERRA, F. C. F.; ARAÚJO, L. L.; MEDEIROS, L. D. C. "Correntes Transitórias de Magnetização em Transformadores de Potência", Universidade Federal de Campina Grande.

- [11] NOGUEIRA, D. Da Silva; ALVES, D. Prandino. "*Transformadores de Potência - Teoria e Aplicação: Tópicos Essenciais*", Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Abril de 2009.
- [12] WSTRO - Wavestar Software for Oscilloscopes User Manual - Disponível em: <http://www.tek.com> - Acessado em 24/02/2013.